



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Ville Hiltunen

CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien hyödyntäminen teollisuusyrityksen tuotesuunnittelussa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 29.5.2017

Valvoja: Professori Kari Tammi

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Arttu Kamppila

Tekijä Ville Hiltunen

Työn nimi CAD-intergroitujen suunnitteluautomaattien hyödyntäminen
teollisuusyrityksen tuotesuunnittelussa

Koulutusohjelma Konetekniikka

Pääaine Koneensuunnittelu

Koodi K3001

Työn valvoja Professori Kari Tammi

Työn ohjaaja(t) DI Arttu Kamppila

Päivämäärä 29.5.2017

Sivumäärä 84+11

Kieli suomi

Tiivistelmä

Automaatteja on käytetty menestyksekkäästi jo pitkään teollisuusyritysten tuotanto-tehtävissä mutta tuotesuunnittelun osalta automaattien hyödyntäminen on edelleen harvinaista siitä huolimatta, että teknologia siihen on olemassa. Tätä teknologiaa edustavat CAD-integroidut suunnitteluautomaatit, jotka perustuvat KBE-menetelmien käyttöön. KBE-menetelmät pyrkivät yhdistämään tekoälyn, ohjelmoinnin ja tietokoneavusteisen suunnittelun tarjoamat mahdollisuudet, joiden avulla luoduilla suunnitteluautomaateilla pystytään tehostamaan insinöörien suunnittelutyötä ja tuottamaan entistä laadukkaampia tuotteita. CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien hyödyt perustuvat mahdollisuuteen kerätä suunnittelusäännöt tuotemalliin, jonka avulla rutiinityötehtäviä pystytään huomattavasti nopeuttamaan sekä lisäämään iteratiivista tarkastelua tuotteen laadun optimoimiseksi. Täten automaattien hyödyntämisellä suunnittelutehtävissä voidaan saavuttaa merkittävää kilpailuetua seuraamalla alan edelläkävijöitä.

Työssä tutkitaan olemassa olevia kaupallisia suunnitteluautomaatio-ohjelmistoja ja tehdään selvitys työn toimeksiantajayrityksen Metso Flow Control Oy:n tarpeista CAD-integroidulle suunnitteluautomaatille. Tutkimus toteutetaan ohjelmistotarjoajayritysten sekä Metso Flow Control Oy:n työntekijöiden haastatteluihin perustuen. Työssä valitaan löydettyjen ohjelmistovaihtoehtojen ja toimeksiantajayrityksen tarpeiden mukaan sopivin ohjelmistokokonaisuus. Valitulla ohjelmistokokonaisuudella toteutetaan käyttöönottokokeilu automaatilla saavutettavien hyötyjen todistamiseksi. Käyttöönottokokeilussa rakennetaan suunnitteluautomaatti toimeksiantajayrityksen yhden rajatun tuotesarjan suunnitteluun. Käyttöönottokokeilussa toteutettavalla automaatilla ei pyritä kattamaan kaikkea kyseisen tuotesarjan suunnitteluun liittyviä tehtäviä vaan suunnitteluautomaatin toimintaa demonstroidaan yksittäisillä tehtävillä ja ominaisuuksilla. Siten pyritään osoittamaan, kuinka automaattia voitaisiin jatkossa hyödyntää, jos automaatin kehitystyöhön asetettaisiin sen vaatimat resurssit. Työn lopussa analysoidaan suunnitteluautomaatilla saavutettuja hyötyjä sekä annetaan kirjoittajan ehdotuksia jatkotoimenpiteille ohjelmiston kehittämistä ja käyttöönottoa varten.

Avainsanat suunnitteluautomaatio, suunnitteluautomaatti, Knowledge-based engineering -menetelmät, tuotemalli, SolidWorks, Rulestream



Author Ville Hiltunen

Title of thesis CAD integrated design automation utilization in the product engineering of an industrial company

Degree programme Mechanical Engineering

Major Machine Design

Code K3001

Thesis supervisor Professor Kari Tammi

Thesis advisor(s) Arttu Kamppila, M.Sc. (Tech.)

Date 29.5.2017

Number of pages 84+11

Language Finnish

Abstract

Automatons have been successfully used in the production of industrial companies for years but in the product engineering the utilization of automatons is still rare, even though the technology is established. CAD integrated design automation represents this technology, which is based on knowledge-based engineering. Knowledge-based engineering tries to combine the possibilities of artificial intelligence, computer programming and computer aided design, which makes companies possible to create design automatons. Design automatons can be used for streamlining engineering work and for improving the quality of products. The benefits of CAD integrated design automation are based on the possibility to collect design rules into a product model, which can be utilized for reducing the time used in repetitive work and for increasing the iterative examination in order to optimize product quality. Thus, by following the pioneers in the utilization of CAD integrated design automation, companies may gain a remarkable competitive advantage.

Research for commercial design automation software and for the requirements of the employer company Metso Flow Control Inc. is executed in this paper. The research is implemented by interviewing Metso Flow Control employees and companies that offer software for design automation. The most suitable system is selected based on the requirements of the employer company from the software options found in research. The chosen software is used for creating a proof-of-concept application in order to prove the possible benefits of design automation. During the proof-of-concept a design automaton is created for the engineering work of one restricted product series. The created automaton does not try to cover all the engineering work in the selected product series but the functionalities are demonstrated with individual tasks and features. The aim of the proof-of-concept is to demonstrate how design automation could be utilized in the future if needed resources are set to the development work of the automaton. At the end of this paper the gained benefits are analyzed and the writer gives some proposals for the next steps of developing and exercising the software and design automation.

Keywords design automation, knowledge-based engineering, CAD integrated design automation, product model, SolidWorks, Rulestream

Alkusanat

Diplomityöni aihe on osittain jatkoa Juho Laasasen samaan toimeksiantajayritykseen vuonna 2015 tehdyille diplomityölle aiheesta ”3D-suunnittelun tehostaminen sarjatuotteille”. Toimeksiantajayrityksenä työssä toimii Metso Flow Control Oy, jonka suunnittelu- ja kokoonpanotehtävissä olen saanut työskennellä kaikki viisi opiskeluiden kesäjaksoa. Idea diplomityön aiheesta kehittyi mielessäni kolmen viimeisen harjoittelujakson aikana yrityksen suunnittelutehtävissä ja varmistui lopulta kesällä 2016 luettuani Juho Laasasen diplomityön, joka suositteli suunnitteluautomaatin käytön tarkempaa selvitystyötä.

Metso Flow Controlin lisäksi työn tekemiseen on osallistunut merkittävä määrä edustajia muista yrityksistä, jotka ovat Metso Minerals, Ideal PLM, PLM Group, Tacton Systems, CadWorks, ENTOP sekä RD Velho. Kiitän kaikkia mainittuja yrityksiä ja heidän työhön osallistuneita edustajiaan. Erityisesti haluan kiittää Metso Flow Controlin työn ohjaajana toiminutta Arttu Kamppilaa sekä Hannu Itkosta ja Jukka Borgmania, jotka mahdollistivat tämän työn toteuttamisen sekä Ideal PLM:n Ilkka Karvosta, Jarno Renkoa, Lauri Majamaata ja Mikko Luomaa, joiden ansiosta työn kokeellinen osio oli toteutettavissa. Professori Kari Tammea kiitän työni valvomisesta. Haluan kiittää myös kaikkia kollegoitani Metso Flow Controlilla, jotka ovat antaneet minulle korvaamattoman arvokkaita oppeja työssäni. Toivon, että tämän työn tuloksilla on positiivinen vaikutus teidän työhönne.

Lisäksi suuri kiitos kuuluu rakkaalle tyttöystävälleni, perheelleni ja läheisimmille ystävilleni, jotka ovat diplomityöni ja koko opiskelujeni ajan olleet minulle korvaamaton tuki.

Espoossa 16.5.2017

Ville Hiltunen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Lyhenteet	7
1 Johdanto	8
1.1 Tausta ja tutkimusongelma	8
1.2 Tavoitteet ja rajaukset	9
1.3 Kohdeorganisaatio Metso Flow Control Oy	10
2 Teoria	11
2.1 KBE-menetelmät ja tuotemalli	11
2.2 CAD-automaatio	16
2.2.1 CAD-automaation monimutkaisuuden tasot	16
2.2.2 3D-mallin muunneltavuus	18
2.2.3 Konfigurointi	22
2.3 Tuotetiedon hallinta ja varastointi	23
2.3.1 Tuote ja nimikkeet	24
2.3.2 Valmistusdokumentit ja revisiointi	26
2.4 Suunnitteluautomaattien hyödyt yritykselle	27
2.4.1 Tehokkuus	27
2.4.2 Standardointi	29
2.4.3 Laatu	31
3 Tutkimusmenetelmät	33
3.1 SolidWorks suunnitteluympäristönä	33
3.2 Tutkimus ohjelmistovaihtoehtoista	35
3.2.1 Tacton Design Automation, Tacton Systems	35
3.2.2 AutomateWorks, CadWorks	39
3.2.3 Rulestream ETO, Siemens PLM Software	44
3.3 Ohjelmiston valinta	51
3.3.1 Valintakriteerit	51
3.3.2 Vertailumenetelmät	53
3.3.3 Valittu ohjelmistokokonaisuus	54
4 Ohjelmiston käyttöönottokokeilu	56
4.1 Laajuus ja tavoitteet	56
4.2 Toteutus	58
4.3 Lopputulos	63
5 Tulokset ja johtopäätökset	71
5.1 Suunnitteluautomaatin tuottama hyöty yrityksessä	71
5.2 Suositellut jatkotoimenpiteet	74
6 Yhteenveto	78
Lähdeluettelo	80
Liiteluettelo	84

Liite 1: Ohjelmistovaatimukset

Liite 2: Käyttötapausesimerkit

Liite 3: Käyttöönottokokeilun suunnitteluautomaatin toimintakaavio

Liite 4: Automaatin tuottamat koneistuspiirustukset

Liite 5: Automaatilla saavutettu hyöty kustomoinnissa

Lyhenteet

API	Application programming interface, ohjelmointirajapinta
BASIC	Beginners all-purpose symbolic instruction code
BOM	Bill of materials, osalista
CAD	Computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAE	Computer aided engineering, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	Computer aided manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CNC	Computerized numerical control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus
CPQ	Configure price quote
CTO	Configuring-to-order, tilauskohtaisesti konfiguroitu
ERP	Enterprise resource planning, toiminnanohjausjärjestelmä
ETO	Engineering-to-order, tilauskohtaisesti suunniteltu
FEM	Finite element method, elementtimenetelmät
HCCTO	High complexity configuring-to-order, monimutkainen tilauskohtaisesti konfiguroitu
ICARE	Illustrations, constraints, activities, rules and entities
ID	Identifyer, tunnistee
IDE	Integrated development environment, integroitu kehitysympäristö
ISO	International standards organization, kansainvälinen standardoimisjärjestö
KBD	Knowledge-based design
KBE	Knowledge-based engineering
MDE	Model-driven engineering, malliperusteinen suunnittelu
MDO	Multidisciplinary design optimization, poikkitieteellinen optimointi
MOKA	Methodology and tools oriented to knowledge-based engineering applications
MFC	Metso Flow Control Oy
NPS	Nominal pipe size, nimellinen putkikoko
PDM	Product data management, tuotetiedon hallinta
PLM	Product life cycle management, tuotteen elinkaaren hallinta
POC	Proof-of-concept, käyttöönottokokeilu
SQL	Search query language
SW Spec	SolidWorks specification
TC Spec	Teamcenter specification
TC Studio	Tacton Configurator Studio
TDA Studio	Tacton Design Automation Studio
XML	Extensible markup language
2D	Two-dimensional, kaksiulotteinen
3D	Three-dimensional, kolmiulotteinen

1 Johdanto

Koneensuunnittelu on kokenut valtavia mullistuksia viimeisten 30 vuoden aikana tietotekniikan kehityksen myötä. 1980-luvulla yleistyneet 2D CAD-ohjelmistot *engl. Computer Aided Design*, eli tietokoneavusteiset suunnitteluohjelmistot, alkoivat syrjäyttää teollisuuden suunnittelutyökaluina perinteiset piirtolaudat. 2000-luvun vaihteessa 2D-maailmasta siirryttiin 3D-mallintamiseen, mikä on tällä hetkellä hallitseva suunnittelu-menetelmä. Tietotekniikan hyödyntäminen avaa mahdollisuuden myös automaation kehittämiselle. Tuotannossa suuret teollisuusyritykset ovat hyödyntäneet automaatiota jo vuosikaudet, mutta suunnittelun automatisoinnin mahdollisuudet on laajalti huomattu vasta viime vuosien aikana, vaikka se on ollut mahdollista jo pitkään. Siitä huolimatta suunnitteluautomaation käyttö on teollisuudessa vielä vähäistä ja siksi se voi olla merkittävä kilpailuetu teollisuuden suunnitteluprosessien tehostamiseksi.

1.1 Tausta ja tutkimusongelma

Tässä työssä tutkitaan CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien hyödyntämistä teollisuusyrityksen tuotesuunnittelussa. Työ koostuu kolmesta tutkimusosasta, joista ensimmäisessä tarkastellaan alan kirjallisuuden avulla erilaisten CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien toimintaa ja menetelmiä suunnitteluautomaatin luomiseksi sekä niillä useimmiten saavutettavia hyötyjä teollisuusyrityksissä. Toisessa osiossa tehdään tutkimus olemassa olevista kaupallisista ohjelmistoista. Tutkimus toteutetaan pääosin haastatteleamalla suunnitteluautomaatio-ohjelmistoja tarjoavien yritysten edustajia.

Työn kolmas osio eli kokeellinen tutkimus toteutetaan case-esimerkin avulla kohdeorganisaatiossa Metso Flow Control Oy. Siinä valitaan tutkituista kaupallisista ohjelmistoista parhaiten kohdeorganisaation vaatimuksiin sopiva. Valinnassa käytetään yrityksen henkilökunnan kanssa sovittuja valintaperusteita, jotka luodaan yrityksen eri käyttäjäkuntien tarpeiden ja vaatimusten mukaan. Valitulle ohjelmistolle suoritetaan ohjelmiston käyttöönottokokeilu ohjelmistontarjoajayrityksen avulla, jotta nähdään voidaanko suunnitteluautomaateilla saavuttaa Metso Flow Control Oy:ssä toivottuja hyötyjä. Työn lopussa analysoidaan suunnitteluautomaatin käyttöönoton tulevaisuudessa tuomia mahdollisia etuja sekä annetaan kirjoittajan suositukset jatkotoimenpiteille. Lisäksi työn aikana analysoidaan suunnitteluautomaattien laajemman hyödyntämisen tarpeellisuutta sekä siihen vaadittavia toimenpiteitä kohdeorganisaatiossa.

Tämän diplomityön tekijä on opiskellut pääaineenaan koneensuunnittelua ja syventynyt siinä tuotekehitykseen. Sivuaaineenaan kirjoittaja on opiskellut mekatroniikkaa ja siinä erikoistunut myös puhtaisiin ohjelmointikursseihin. Täten aiheena perinteistä koneensuunnittelua, tuotekehitystä ja ohjelmistoteknistä osaamista yhdistävä aihe on työn tekijälle luonteva. Lisäksi kirjoittajalla on kolmen kesäharjoittelujakson mittainen kokemus suunnittelutehtävistä Metso Flow Control Oy:ssä. Työjaksojen aikana syntyi ajatuksia suunnitteluprosessin tehostamisesta yrityksessä ja kiinnostus suunnitteluautomaattien hyötyjen osoittamiseen kohdeorganisaatiossa. Taustana työlle toimii myös Juho Laasasen vuonna 2015 samaan organisaation tekemä diplomityö ”3D-suunnitteluprosessin tehostaminen sarjatuotteille”. Tässä työssä perehdytään tarkemmin Juho Laasasen työssä ilmenneeseen mahdollisuuteen suunnitteluautomaattien hyödyntämisestä Metso Flow Control Oy:ssä.

Yrityksellä on hieman aiempaa kokemusta suunnitteluautomaattien käytöstä. Yrityksessä on kertaalleen kokeiltu uuden tuotteen suunnittelun yhteydessä melko vähäisillä resursseilla rakennettua suunnitteluautomaattia. Automaatti toimi menestyksekkäästi ja sillä saavutettiin odotetut hyödyt. Automaatti jäi kuitenkin resurssien puutteen vuoksi tasolle, jolla siitä puuttui kohtuullisella perehtymisellä omaksuttavissa oleva käyttöliittymä sekä mahdollisuus tuotteiden ylläpitoon. Siten automaattia osasi käyttää vain sen tekijät, eikä sitä enää hyödynnetty kyseisen tuotteen suunnittelun jälkeen. Yrityksessä on kertaalleen myös tehty tutkimus muutamasta tarjolla olevasta kaupallisesta suunnitteluautomaatio-ohjelmistosta. Tutkimus on tosin tehty vuonna 2013 (Metso 2013), joten useita uusia ohjelmistoja on ehtinyt tulla markkinoille. Lisäksi osa tuossa tutkimuksessa käytetyistä valintaperusteista on vanhentuneita.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän työn tavoitteena on tutkia suunnitteluautomaattien käytön etuja kohdeorganisaation suunnittelu- ja ylläpitotehtävissä. Työssä tehtävän ohjelmistotutkimuksen ja vertailun tavoitteena on löytää kohdeorganisaatioon parhaiten sopiva suunnitteluautomaatio-ohjelmisto. Ohjelmistotutkimuksessa keskitytään vähintäänkin SolidWorks-3D-mallinnusohjelmiston kanssa yhteensopiviin järjestelmiin, sillä se on yrityksen hallitseva suunnitteluohjelmisto ja sen arvioidaan pysyvän jatkossakin standardina yrityksen organisaatiossa ympäri maailman. Tavoitteena on myös suorittaa käyttöönottokokeilu valitulle suunnitteluautomaatio-ohjelmistolle tai sen demoversiolle ja kokeilla esimerkinomaisesti tavoitetaanko CAD-integroidulla suunnitteluautomaatilla merkittävää hyötyä erilaisissa suunnittelu- ja ylläpitotehtävissä. Tavoitteena on, että valittu ohjelmisto on jokaisen suunnittelijan omaksuttavissa kohtuullisella paneutumisella ja sitä voidaan jatkossa hyödyntää sekä uusien tuotteiden suunnittelussa että vanhojen tuotteiden ylläpitotehtävissä.

Toissijaisena työn epäsuorana tavoitteena on käynnistää keskustelua kohdeorganisaatiossa suunnitteluohjelmistojen tehokkaamman hyödyntämisen ja toimintatapojen uudistamisen tarpeellisuudesta. Kirjoittaja toivoo työssä esiteltävän suunnitteluautomaatin aloittavan kohdeorganisaatiossa myös suunnittelutehtäviä koskevan uudistusten sarjan, jolla suunnitteluprosessia nykyaikaistettaisiin. Tällöin CAD-integroidut suunnitteluautomaatit olisivat avainroolissa erityisesti itseään toistavien työtehtävien karsimisessa.

Suunnitteluautomaatti on nykyaikana laajasti käytetty käsite, joten tässä työssä tutkittavia automaatteja on syytä rajata. Tämän työn tutkimus kohdistetaan insinöörisuunnittelijoiden työtehtävien tehostamiseen suunnitteluautomaateilla. Täten esimerkiksi pelkästään myynnin työtehtäviin suunnatut konfiguraattorit jätetään tarkastelun ulkopuolelle, sillä sellainen on työn valmistumishetkellä työn kohdeorganisaatiossa jo käytössä. Työssä tutkitaan CAD-integroituja suunnitteluautomaatteja, joten 3D-mallinnuksesta tai teknisten piirustusten tuottamisesta irralliset laskenta-automaatit jätetään myös huomiotta. Metson toimipisteistä tässä työssä keskitytään Metso Flow Control Oy:n Vantaan toimipisteellä havaittaviin suunnitteluautomaattien käyttömahdollisuuksiin työtehtävissä, joissa 3D-mallinnus ja 2D-piirustusten luominen on iso osa suunnittelijoiden työnkuvaa. Informaatiota työn havainnoista jaetaan kuitenkin globaalisti koko yrityksen sisällä, sillä suunnitteluautomaatteja voitaisiin jatkossa mahdollisesti hyödyntää myös muissa yrityksen CAD-ohjelmistoja käyttävissä toimipisteissä ympäri maailmaa.

1.3 Kohdeorganisaatio Metso Flow Control Oy

Metso Oyj on suomalainen prosessiteollisuuden yritys, joka syntyi vuonna 1999 Rauma Oyj:n ja Valmet Oyj:n yritysfuusiona. Metso on kasvanut maailmanlaajuisesti yritykseksi ja työllistää yli 12000 työntekijää yli 50 maassa 6 eri maanosassa (Metso 2016a). Sen liikevaihto oli vuonna 2015 lähes 3 miljardia euroa (Metso 2016b). Metso koostuu kahdesta raportointisegmentistä Metso Flow Control Oy (jatkossa MFC) ja Metso Minerals Oy. MFC tuottaa teollisuusventtiileitä sekä venttiilinohjaimia pääasiassa öljy-, kaasu-, massa-, paperi- ja kaivosteollisuuden tarpeisiin. Metso Minerals Oy tuottaa kaivos- ja maanrakennusalan tukipalveluita, laitteita ja järjestelmiä. Metson liikevaihdosta noin neljännes koostuu MFC:n liikevaihdosta ja vuonna 2015 se oli 778 miljoonaa euroa (Metso 2016b). Liiketoimintalueita Metsolla on kolme ja ne ovat Minerals Services, Minerals Capital ja Flow Control. Minerals Services alue tuottaa palveluita, huoltotoimenpiteitä ja varaosia kaivos- ja maanrakennusalan asiakkaille. Minerals Capital keskittyy alan asiakkaiden laitteiden kuten kivenmurskainten, maansiirtimien ja kierrätyskoneiden tuotantoon. Flow Control liiketoimintalueeseen kuuluu niin venttiilien tuotanto kuin niiden huolto ja ylläpitopalvelut. MFC:n venttiilis suunnittelua sisältäviä toimipisteitä sijaitsee tällä hetkellä Suomen Vantaan toimipisteen lisäksi Shrewsburyssa Yhdysvalloissa, Horgaussa Saksassa, Chungjussa Koreassa ja Shanghaissa Kiinassa.



Kuva 1. Metson Neles-tuotelinjan venttiiliyhdistelmä (Metso, 2016c).

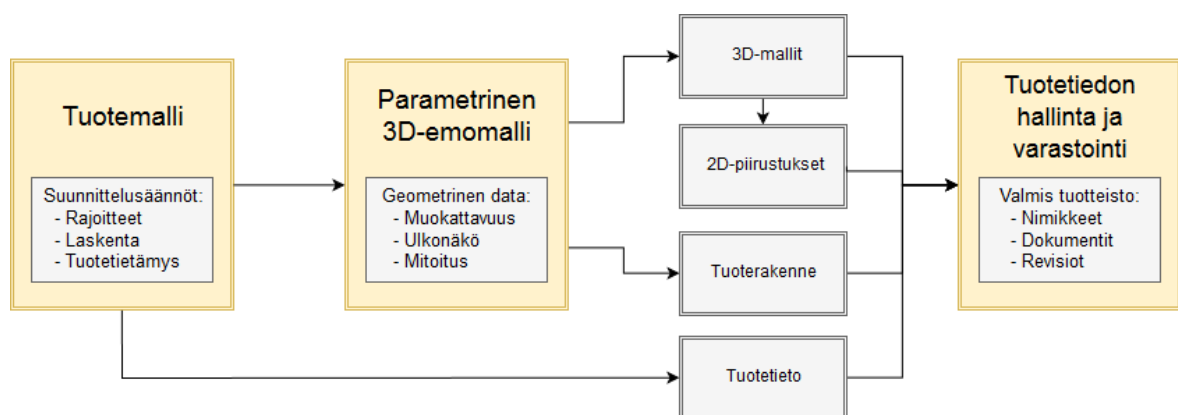
MFC:n valmistama venttiiliyhdistelmä koostuu tyypillisesti venttiilistä, toimilaitteesta sekä asennoittimesta tai rajakytkimestä sekä mahdollisista toimintaa säätävistä lisälaitteista (Kuva 1). Useimmissa tapauksissa venttiiliyhdistelmä myydään kokonaisuutena, jossa venttiili on yksi tuotteen komponenteista, mutta toisinaan venttiileitä myydään myös irrallisena tuotteena esimerkiksi varaosana. MFC:llä on kolme tuoter ryhmää Neles, Jamesbury ja Mapag. Tämän työn suorituspaikkana toimiva Vantaan toimipiste keskittyy Neles-tuotteiden valmistukseen. Neles-tuoteryhmän venttiileihin kuuluu pallo-, läppä-, segmentti-, istukka- ja kiertoistukkaventtiileitä (Metso 2016c). Venttiiliyhdistelmien ja venttiilien lisäksi Neles-tuotenimellä valmistetaan ja myydään erillisinä komponentteina myös toimilaitteita ja asennoittimia sekä muita älykkäitä venttiiliohjaimia myös kilpailijoiden venttiilien

yhteyteen. Metson venttiilit ovat neljänneskiertoventtiileitä, jotka tunnetaan ympäri maailman toimintavarmuudestaan ja laadukkuudestaan. Metso on maailmanlaajuisesti suurin massa- ja paperiteollisuuden venttiilien ja viidenneksi suurin öljy- ja kaasuteollisuuden säätöventtiilien tuottaja (Metso, 2016d). Työn kohdeorganisaationa yritys on otollinen, sillä yrityksessä on käynnissä työn tekohetkellä uuden myyntikonfiguraattorin käyttöönotto. Lisäksi yrityksessä ollaan uudistamassa suunnitteluprosessin rakenteita, mikä osoittaa yrityksen pyrkimyksen pysyä modernina alansa edelläkävijänä myös suunnittelun osalta. Yrityksessä on myös käyty ensikokeilun jäljiltä keskusteluja suunnitteluautomaattien laajemman käytön mahdollisuudesta ja suunnitteluautomaatio-ohjelmistojen tarjoajat ottavat yritykseen aktiivisesti yhteyttä. Täten yrityksestä löytyy valmiiksi tietoa suunnitteluautomaatiosta ja joitain kontakteja kaupallisten ohjelmistojen tarjoajiin.

2 Teoria

Nykyajan teollisuusyritysten on mukauduttava asiakkaan vaatimukseen yhä aiempaa enemmän. Henry Fordin massatuotantoa kuvaava toteamus ”voit saada autoosi, minkä tahansa värin kunhan se on musta” ei kuvaa nykyisiä asiakkaiden tarpeita. Massatuotannosta siirryttiin ensin massaräätälöintiin ja nykyään trendi on siirtymästä tuotteiden yksilöistämiseen asiakkaan tarpeiden mukaisiksi (Felfernig 2014, s. 3). Tässä kehityksessä suunnitteluautomaatit ovat avainroolissa säilyttämässä suunnittelutyön läpimenoaikojen kilpailukykyisyyttä. Yksinkertaisia suunnitteluautomaatteja on käytetty jo 1990-luvun alkupuolelta lähtien, kun tekoälyn käyttö teollisuuden suunnittelutehtävissä alkoi yleistyä (Cheok ja Nee 1998). Nykyään suunnitteluautomaatteja hyödynnetään hyvin vaihteleviin tarkoituksiin esimerkiksi materiaalikustannusten minimointiin, itseään toistavan suunnittelutyön minimointiin ja nopeuttamiseen sekä myyntikonfiguraattoreina myynnin edistämiseen ja asiakaskokemuksen parantamiseen.

Suunnitteluautomaatio on käsitteenä hyvin laaja ja vaikeasti määritettävissä. Termiä käytetään alan kirjallisuudessa hyvin monenlaisten järjestelmien kuvaamiseen. Tässä työssä käsiteltävällä CAD-integroidulla suunnitteluautomaatilla tarkoitetaan Kuvan 2 mukaista ohjelmistokokonaisuutta, joka sisältää tuotteen suunnittelusääntöjen sisällyttämisen tuotemalliin ja tuotemallin perusteella vähintään automaattisen 3D-mallien tai valmistuspiirustusten luomisen tuotteelle parametrinen 3D-emomallin tai emopiirustuksen perusteella. Suunnitteluautomaatilla voidaan myös tuottaa tuoterakenteita osalistoineen ja muuta tuotetietoa, kuten attribuutteja. Näissä tapauksissa automaattiin halutaan usein liittää tuotetiedon hallinta ja varastointi sekä nimikkeiden automaattinen luonti. Luotuja nimikkeitä ja valmistusdokumentteja varastoidaan ja ylläpidetään tuotetiedonhallintajärjestelmän avulla (Peltonen et al. 2002). Tässä kappaleessa perehdytään suunnitteluautomaattien sisältämään teknologiaan tuotemallien rakentamisessa, erilaisiin automaattityyppeihin CAD-automaation toteuttamiseksi, tuotetiedon hallintaan ja varastointiin sekä suunnitteluautomaatilla saavutettaviin hyötyihin teollisuusyrityksissä.



Kuva 2 CAD-integroidun suunnitteluautomaatin sisältämä kokonaisuus

2.1 KBE-menetelmät ja tuotemalli

Yksityiskohtaisen tuotteen automaattisen suunnittelun perustana on tuotetietämyksen ja suunnittelusäännösten sisällyttäminen tietojärjestelmän tuotemalliin (Kuva 2). Tiedon keräämisessä ja tuotemallin luomisessa voidaan hyödyntää knowledge-based engineering -menetelmiä (jatkossa KBE-menetelmät). KBE-menetelmät auttavat suunnittelutiedon

virtuaalisen prototyypin eli tuotemallin luomisessa monipuolisesta suunnittelijoiden tuotetietämyksestä, johon kuuluvat muun muassa tuotteen suunnittelun tarkoituksellisuus, rajoitukset ja säännöt, vaatimukset, järjestellinen perusta, logiikka, attribuutit sekä geometrinen informaatio. Lisäksi tuotteen toiminnallisuutta, materiaalivalintoja, staattista ja dynaamista kuormitusta sekä valmistusmahdollisuutta voidaan arvioida tuotemallin avulla. Tuotemallia voidaan myöhemmin käyttää tuotteen suunnitteluprosessin kuvastamiseen sekä monimutkaisen suunnitteluautomaation toteuttamiseen. (Trehan et al. 2015.) KBE-menetelmien avulla voidaan siten luoda insinööritietoutta sisältäviä KBE-järjestelmiä eli suunnittelu-automaatteja. Järjestelmät pystyvät järjestelmällisesti uudellenkäyttämään tuotteeseen ja prosessiin liittyvää tietoa vähentäen insinöörisuunnitteluun käytettävää aikaa ja kustannuksia automatisoimalla itseään toistavia ja epäluovia suunnittelutehtäviä.

Alan kirjallisuudessa KBE-menetelmiksi kutsutaan yleisesti tietokonepohjaisia insinöörisuunnittelun tehtäviä automatisoivia metodeja, oppeja ja työkaluja (Willner et al. 2016). KBE-menetelmät edistävät erityisesti kustomoitavien ja vaihtelevien tuotteiden suunnittelun automatisointia yhdistämällä olio-ohjelmoinnin, tekoälyn ja tietokoneavusteisen suunnittelun (Chapman ja Pinfold 2001, La Rocca 2012). KBE-menetelmät voidaan täten luokitella tietämysteknologioihin *engl. knowledge technologies*, jotka ovat joukko uusia tietokonepohjaisia tekniikoita ja työkaluja tarjoten entistä rikkaampaa ja älykkäämpää tietotekniikan hyödyntämistä (La Rocca 2012). Tietämysteknologioiden tehokkuus perustuu ideoiden ja sovellusten yhdistämiseen eri tieteiden, kuten insinööritieteiden, kauppatieteiden, tietojenkäsittelytieteiden, WEB-tekniikan, tekoälyn, filosofian ja psykologian osa-alueilta (La Rocca 2012). Tietämysteknologiat keskittyvät tietoon ja tiedonhallintaan, mikä teollisuuden tarpeissa luo haasteita, kuten: Kuinka keskeinen tietämys tunnistetaan, miten tieto kerätään ja muotoillaan jatkokäytön mahdollistamiseksi, kuinka tieto esitetään ja varastoidaan, jotta siihen päästään käsiksi ja sitä voidaan ylläpitää, siirtää ja uudelleenkäyttää sekä kuinka tieto onnistutaan sulauttamaan tietoteknisiin järjestelmiin? Tietämyksen sisällyttäminen tietoteknisiin järjestelmiin tuotemallien muodossa mahdollistaa insinööri-työn tehostamisen suunnitteluautomaation avulla, mikä on KBE-menetelmien tärkein tehtävä. Suunnitteluautomaattiin sisällytettyä tietoa voidaan uudelleenkäyttää ja siten automatisoida rutiininomaisia ja itseään toistavia työtehtäviä. Lisäksi tiedon sisällyttäminen tietotekniseen muotoon helpottaa optimointi- eli MDO-työkalujen *engl. Multidisciplinary Design Optimization* käyttöä kaikissa suunnittelu-prosessin vaiheissa. MDO-työkaluja voidaan hyödyntää dynaamisen laskennan ja iterointien nopeuttamiseen sekä generatiiviseen mallinnukseen ja dokumentoinnin luomiseen. (La Rocca 2012.) Suunnitteluautomaattien tuottamia hyötyjä yritykselle pohditaan tarkemmin luvussa 2.3.

KBE-menetelmät ovat verrattain uutta teknologiaa, jonka merkittävä potentiaali insinöörisuunnittelussa on tiedostettu sen alkuaajoista lähtien (La Rocca 2012). Sen juuret ovat 1980-luvulla (Verhagen et al. 2012), jolloin CAD-ohjelmistot alkoivat yleistyä 2D-piirtämisessä. Nopeasti CAD-ohjelmistojen yleistymisen jälkeen havaittiin ohjelmoinnin ja tekoälyn hyödyt CAD-ympäristössä – erityisesti itseään toistavan työn automatisoinnissa (Verhagen et al. 2012). Ensimmäinen kaupallinen KBE-menetelmiin perustuva suunnitteluautomaatio-ohjelmisto ICAD julkaistiinkin jo samalla vuosikymmenellä (La Rocca 2012). Lentokone- ja autoteollisuuden yritykset olivat ensimmäisiä teollisuudenaloja, joilla KBE-menetelmät otettiin laajamittaiseen käyttöön (Verhagen et al. 2012), mikä suurena osana jatkuvaa tuotekehitysprosessien optimisointia ja kehittämistä on mahdollistanut uuden auton kehitysprosessin vaatiman ajan putoamisen yli viidestä vuodesta

noin kahteen vuoteen viime vuosikymmenien aikana (Salchner et al. 2016). Huolimatta siitä, että KBE-menetelmien potentiaali on tunnettu pitkään ja ohjelmistoja on ollut saatavilla jo noin 30 vuoden ajan, vasta 2000-luvun aikana ne on alettu ottaa vakavasti käyttöön myös muilla teollisuuden aloilla (La Rocca 2012). Varsinaista laajamittaista läpilyöntiä ei kuitenkaan olla vielä nähty (Verhagen et al. 2012). Yritysten varovaisuuteen KBE-menetelmien laajamittaisessa käyttöönotossa ovat vaikuttaneet negatiivisesti ainakin seuraavat tekijät (La Rocca 2012, Cheok ja Nee 1998):

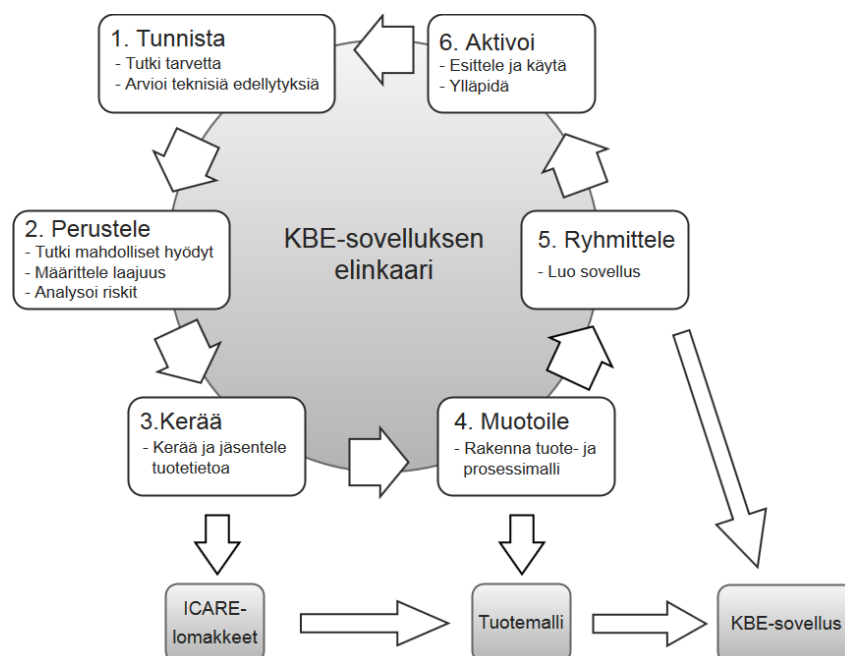
- tiedon puute
- suuret ohjelmisto- ja laitekulut
- ohjelmistojen käytettävyys
- ohjelmistojen markkinointitapa
- pelko kriittisen tiedon leviämisestä.

Yleisesti saatavilla olevaa aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, menetelmien käyttökokemuksia tai mittareita onnistuneen käyttökokeilun todistamiseen on ennen 2010-lukua ollut vain vähän (La Rocca 2012). Viime vuosien aikana tieteellisiä julkaisuja on kuitenkin tuotettu melko runsaasti, joten tietoa on nykyisin saatavilla merkittävästi paremmin. Suunnitteluautomaatiojärjestelmän käyttöönottokulut olivat ohjelmistojen alkuaikoina niin suuret, että tarvittavien lisenssien ja laitteiden hankinta oli mahdollista vain kaikkein menestyksekkäimmille yrityksille. Yksittäisen lisenssin hinta oli ensimmäisen sukupolven KBE-ohjelmistoille jopa \$100 000 vuodessa, minkä lisäksi käyttö vaati sitä varten luodun Lisp-laitteiston (La Rocca 2012). Sitten lisenssien hinnat ovat pudonneet merkittävästi ja kaikki nykyisin markkinoilla olevat ohjelmistot pyörivät jokaisella nykyaikaisella kannettavalla Windows-tietokoneella huomattavasti ensimmäisen sukupolven ohjelmistoja nopeammin. KBE-menetelmien alkuaikoina ohjelmistot olivat hyvin vaativia käyttää ja ne oli ohjelmoitu tiettyä käyttökohdetta varten. Ohjelmistojen käyttö vaati ohjelmointitaitoa, mikä aiheutti suuria haasteita CAD-ympäristön graafisiin käyttöliittymiin tottuneille insinööreille. Lisäksi ohjelmistojen kehityksessä käytettiin harvoin aikaa ohjekirjan luomiseen. Näin ollen niiden käyttö jäi lyhytaikaiseksi, kun kattavia alustoja suunnitteluautomaation kehittämiseksi ei ollut tarjolla nykyisen kaltaisesti. 1990-luvulla World Wide Webin keksiminen mahdollisti ohjelmistojen kehittämisen avoimella lähdekoodilla, mikä oli merkittävä askel KBE-ohjelmistojen kehittymiselle tapauskohtaisista sovelluksista kattaviksi toiminta-alustoiksi. KBE-järjestelmien alkuperäinen markkinointitapa voidaan myös kyseenalaistaa, sillä ohjelmistoja haluttiin kehittää ja myydä irrallaan insinöörityön mullistaneista CAD-ohjelmistoista. (La Rocca 2012.) Nykyisin useimmat CAD-ohjelmistot sisältävät joitain KBE-työkaluja itsessään ja kaupalliset ohjelmistot ovat valmiiksi integroituja CAD-ohjelmistoihin. Viidentenä merkittävänä seikkana jarruttamassa suunnitteluautomaattien laajaa käyttöönottoa on alusta saakka ollut yritysten ja yritysten työntekijöiden haluttomuus jakaa kriittistä informaatiota kilpailevien yritysten tai kilpailevien työntekijöiden kanssa (Cheok ja Nee 1998). Kaikkien KBE-menetelmien ja suunnitteluautomaattien perustana on tuotekohtaisen suunnittelutiedon sisällyttäminen tietojärjestelmiin. Luonnollisesti yritykset haluavat olla varmoja, ettei yrityksen kilpailukyvyn kannalta kriittiset tiedot pääse yrityksen ulkopuolelle. Täten tuotetiedon kerääminen sähköisessä muodossa yksittäiseen tietokantaan voi kuulostaa riskialttiilta. Isoja haasteita aiheuttaa myös työntekijöiden haluttomuus jakaa hänen työnsä kannalta kriittistä tietoa, sillä työntekijä voi kokea menettävänsä korvaamattomaksi kokevansa aseman (Cheok ja Nee 1998). Tästä huolimatta suunnitteluautomaattien menestyksekkään toiminnan

kannalta on kriittistä, että kaikki olemassa oleva relevantti tieto saadaan sisällytettyä järjestelmään.

KBE-sovelluksen luomiseen ja käyttöönottoon yrityksessä on olemassa useita eri menettelytapoja ja toimintamalleja, mutta laajoissa järjestelmissä usein käytetty tapa on MOKA-metodologia *engl. Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications*. MOKA-metodologiassa KBE-sovelluksen kehitys koostuu Kuvan 3 mukaisesti jatkuvan kierron kuudesta vaiheesta: tunnistamisesta, perustelusta, keräämisestä, muotoilusta, ryhmittämisestä ja aktivoinnista. (Trehan et al. 2015.)

Ensimmäisessä vaiheessa tunnistetaan yrityksen tarve KBE-menetelmiin perustuvalle suunnitteluautomaatille ja arvioidaan automaatin teknistä soveltuvuutta organisaatioon (Trehan et al. 2015). Tunnistusvaiheen jälkeen tulee perustella suunnitteluautomaatin tuottamat taloudelliset hyödyt ja määrittää ohjelmiston laajuus sekä käyttökohde. Tässä vaiheessa tulee myös analysoida suunnitteluautomaatin aiheuttamat riskit. Kun ohjelmiston kohde, laajuus ja riskit on analysoitu voidaan siirtyä tuotetiedon keräämisen vaiheeseen.



Kuva 3 MOKA-metodologian mukainen KBE-sovelluksen kehitys
(Trehan et al. 2015, Verhagen et al. 2012, mukaillen)

Kierron kolmas vaihe on MOKA-metodologian mukaan työvaiheista kaikkein tärkein. (Trehan et al. 2015) Jos tuotetieto onnistutaan keräämään kattavasti ja tarkasti, tuotemallin luominen helpottuu merkittävästi ja lopputuloksen onnistuminen on todennäköisempää. Sovelluksen hyödyt ovat hyvin riippuvaisia tuotemallin täsmällisyydestä ja laajuudesta (Trehan et al. 2015). Tyypillisesti tuotetiedon kerääminen on kolmivaiheinen prosessi, jonka toimenpiteet ovat oleellisen tuotetiedon tunnistaminen, hankinta ja kodifikaatio (La Rocca 2012). Kodifikaatiolla tarkoitetaan sen tiedon kokoamista tietokantaan, mitä KBE-sovelluksessa halutaan käyttää (La Rocca 2012). Sovelluksen kehityksen keräysvaiheessa hyödynnetään ICARE-lomakkeita epämuodollisten tietomallien luomiseksi. ICARE-lomakkeisiin *engl. Illustrations, Constraints, Activities, Rules and Entities* pyritään kuvaamaan nimensä mukaisesti tuotteen ulkonäkö havainnekuvin, suunnittelun rajoitteet, tuotteen toiminnallisuudet, suunnittelua ohjaavat säännöt sekä tuoterakenteen sisältämät

kokonaisuudet (Verhagen et al. 2012). Lisäksi kaikki taulukkkodata, kuten standardit, on syytä lisätä jo epämuodolliseen tietomalliin, jotta tuotemallin luominen perustetaan todelliselle suunnittelutyölle. Epämuodollisista tietomalleista kehitetään muotoiluvaiheessa muodollisia tietomalleja luomalla tarvittavat tuote- ja prosessimallit, mikä on toinen MOKA-metodologian painottama työvaihe (Trehan et al. 2015). Tämän jälkeen ryhmittelyvaiheessa tuote- ja prosessimallit yhdistetään toisiinsa ja rakennetaan KBE-sovellus. Sovelluksen testaamisen kehittämisen myötä KBE-menetelmiä hyödyntävä suunnitteluautomaatti voidaan aktivoida käyttöön. Aktivointivaiheessa tärkeää on sovelluksen kattava esittely ja käyttöönotto sekä ylläpito (Trehan et al. 2015). Kehittämisen jälkeen KBE-sovellusta eli suunnitteluautomaattia käytetään yleensä osana laajempaa insinöörisuunnitteluprosessia (La Rocca 2012). Tyypillistä on, että KBE-sovellus integroidaan CAD-ohjelmiston kanssa esimerkiksi tuotteen visualisoimiseksi, laadun tarkastelemiseksi ja tuotantodokumenttien luomiseksi (La Rocca 2012), jolloin sovellusta voidaan kutsua CAD-integroiduksi suunnitteluautomaatiksi. CAD-automaation toteutusmenetelmiin perehdytään tarkemmin luvussa 2.2 ja erilaisia kaupallisia CAD-integroituja suunnitteluautomaatio-ohjelmistoja esitellään luvussa 3.2. Automaatin toiminnan laajuus ja laatu on vahvasti riippuvainen luodusta tuotemallista, jonka sisältämään tietoon perehdytään tarkemmin seuraavaksi.

Työssä käsiteltävien insinöörisuunnittelun suunnitteluautomaattien tuotemallit koostuvat esimerkiksi rajoitteista, faktoista, määritteistä ja laskennasta eli kaikesta tuotteeseen liittyvästä tiedosta, jota kutsutaan KBE-menetelmissä yleisellä termillä suunnittelusäännöiksi (La Rocca 2012). Tuotemalliin sisällytettävät suunnittelusäännöt voidaan jakaa viiteen eri ryhmään (La Rocca 2012):

- loogiset säännöt
- matemaattiset säännöt
- geometriset säännöt
- topologiset säännöt
- kommunikaatiosäännöt.

Loogiset säännöt ohjaavat tuotteen suunnittelua käyttäjän tekemien valintoihin perustuen. Tyypillinen tapa toteuttaa loogisia päättelyketjuja ohjelmoinnissa on if-else-rakenteet, joihin myös ensimmäiset kaupalliset KBE-menetelmiä hyödyntävät sääntöpohjaiset tuotekonfiguraattorit perustuivat (Syrjänen 1999). Nykyaikaisiin suunnitteluautomaatteihin voidaan sisällyttää kehittyneempiä ja tehokkaampia ehtojen esitystapoja, kuten case-rakenteita. Matemaattiset säännöt sisältävät kaiken tuotteen suunnitteluun liittyvän laskennan, kuten aritmeettiset ja trigonometriset operaatiot sekä matriisi- ja vektorilaskennan. Aritmeettiset ja trigonometriset laskentaoperaatiot löytyvät tyypillisesti KBE-ohjelmista valmiina perusfunktioina. Haastavamman laskennan suorittamiseen ohjelmassa on tyypillisesti oma ohjelmointikieliriippuvainen toteutustapansa. (La Rocca 2012.) Geometriset säännöt ohjaavat tuotteen muotoa ja ulkonäköä. CAD-integroiduissa suunnitteluautomaateissa geometriset säännöt määrittävät 3D-mallin morfologisen tilan eli esimerkiksi tuotteen koon, pintojen muodot ja piirteiden sijainnit (La Rocca 2012). Tuotteen geometriaan voivat vaikuttaa myös topologiset säännöt, joilla tyypillisesti ohjataan tietyn ominaisuuden tai osan olemassaoloa tai lukumäärää. Tyypillisesti topologisen säännön sisältävä parametri on datatyypiltään joko totuusarvo tai kokonaisluku (La Rocca 2012). Topologinen sääntö voi kuitenkin sisältää myös monimutkaisempaa logiikkaa, jolla määritetään esimerkiksi mikä osa tuoterakenteeseen valitaan loogisten ja matemaattisten

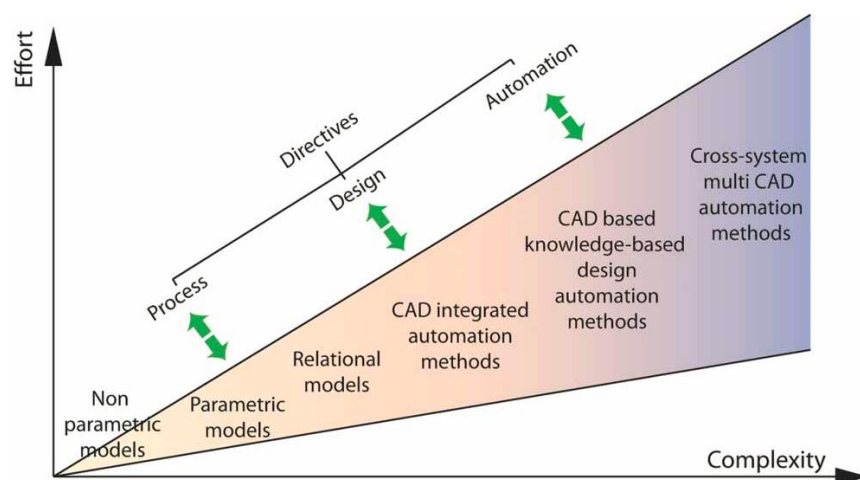
sääntöjen perusteella (La Rocca 2012). 3D-mallien morfologiseen ja topologiseen muokattavuuteen perehdytään syvällisemmin luvussa 2.2.2. Viides ja viimeinen ryhmä kommunikaatiosäännöt määrittävät KBE-ohjelman mahdollisuudet vuorovaikuttaa muiden ohjelmien ja tietokantojen kanssa (La Rocca 2012). Tarvittavaa dataa tulee pystyä jakamaan esimerkiksi CAD-ohjelmiston tai PDM-järjestelmän ja suunnitteluautomaatin välillä, mikä mahdollistetaan kommunikaatiosäännöillä.

2.2 CAD-automaatio

Suunnittelusääntöjen hallinta ja tulkinta 3D-avaruudessa on sopivan ratkaisun löytämisen ja ohjelmiston ylläpidettävyyden kannalta suuri haaste CAD-integroiduille suunnitteluautomaateille (Chung et al. 2000). Suunnitteluautomaatin tulee hallita laajoja ja monimutkaisia kokonaisuuksia, mitä voivat vaikeuttaa esimerkiksi tuotteen epälineaarisuudet, useat mahdolliset ratkaisuvaihtoehdot, heikot lähtöarvot ja käyttäjän ymmärtämättömyys tuotteesta tai käytettävästä ohjelmistosta (Chung et al. 2000). Viime vuosien aikana MDE:sta *engl. Model-Driven Engineering* eli malliperusteisesta suunnittelusta on kehittynyt yksi lupaavimmista menetelmistä ratkaista ohjelmistojen monimutkaisuus- ja kehittämisongelmia (Teodorov ja Lagadec 2014). Malliperusteinen suunnittelu on avainasemassa CAD-integroituja suunnitteluautomaatteja rakennettaessa, sillä tuotetieto sisällytetään tuotemalleihin. Osa tuotemallien sisältämistä säännöistä on geometrisia sääntöjä, joista suuri osa on sidottuna tuotemalliin sidottuihin parametriin 3D-emomalleihin ja 2D-emopiirustuksiin. Suunnitteluautomaatin työn lopputuloksena saadaan tuotteen valmistukseen tai määrittelyyn liittyviä CAD-ohjelmiston avulla luotuja dokumentteja, kuten 3D-malleja ja -kokoonpanoja 2D-valmistuspiirustuksia, osalistoja, kustannusarvioita tai suunnitteluraportteja (Lad ja Rao 2014).

2.2.1 CAD-automaation monimutkaisuuden tasot

CAD-automaatiota hyödyntävät järjestelmät voidaan jakaa kuuteen eri tasoon järjestelmältä vaadittavien ominaisuuksien ja siten järjestelmään sisällytettävän säännösten monimutkaisuuden mukaan (Salchner et al. 2016). Järjestelmän monimutkaistuesssa myös sen luomiseen vaadittava työpanos kasvaa (Kuva 4). Eri tasoisia CAD-automaatiojärjestelmiä käytetään erilaisiin käyttötarkoituksiin, joista Kuvan 4 diagrammissa on esitetty prosessien nopeuttaminen, suunnittelutehtävien helpottaminen automaation avulla sekä suunnittelu-prosessin täysautomatisointi.



Kuva 4 CAD-automaation monimutkaisuuden tasot (Salchner et al. 2016)

Tyypillinen tapa toteuttaa 3D-malleja CAD-ohjelmistossa on joko aloittaa uuden luominen tyhjästä tai käyttää aiemmin luotua tallennettua pohjamallia kyseiseen tuotteeseen. Mahdollinen pohjamalli on kiinteä 3D-malli, jossa mallin mitoitus ja geometria on määritetty käyttäjän luomien pysyvien mittojen, piirustusten ja piirteiden mukaisesti. Insinööri toteuttaa uuden 3D-mallin luomalla malliin tarvittavat piirteet hänen valitsemillaan mitoilla, joita ei ole suunniteltu muokattavaksi jatkossa rikkomatta mallia. Tapauksessa, jossa luotua geometriaa halutaan muunnella myöhemmin malli täytyy rakentaa kokonaan uudestaan, jos halutaan olla varmoja, ettei olemassa oleva malli rikkoudu (Salchner et al. 2016). Tällä tasolla automaatiota ei hyödynnetä lainkaan, jolloin luotuja 3D-malleja voidaan kutsua kiinteiksi malleiksi. Kiinteät mallit *engl. non parametric models* ovat Kuvassa 4 esitetyn diagrammin alhaisin taso CAD-automaatiolle.

Seuraava taso perustuu parametrusten suunnittelumenetelmien käyttöön, jossa 3D-malli on luotu muunneltavissa oleviin mittoihin perustuen (Salchner et al. 2016). Mallin mittamuutokset voidaan tehdä suoraan piirteen geometrian määrittävään piirustukseen tai piirteen ominaisuuksiin (Salchner et al. 2016). Toinen mahdollinen tapa on määrittää parametreja, joita ohjataan itsenäisesti geometriasta irrallaan kuitenkin geometriaan linkitettyinä esimerkiksi nimeämisen perusteella. Parametrit voidaan tallentaa esimerkiksi taulukkona, mikä mahdollistaa useiden parametrien muokkaamisen samanaikaisesti. Parametreja voidaan käyttää myös mallin materiaalin, toleranssien sekä muiden oleellisten ominaisuuksien määrittelyyn. Tällaisia parametrien ohjaamiseen perustuvia muunneltavia malleja kutsutaan parametrisiksi 3D-emomalleiksi *engl. parametric models*. (Hirz et al. 2013, s. 329.)

Kolmas ja viimeinen CAD-ohjelmiston sisällä toteutettavissa oleva CAD-automaation taso on relaatiomallit *engl. relational models* (Kuva 4). Relaatiomalleilla tarkoitetaan parametrisoituja 3D-malleja, joiden parametrit ovat riippuvaisia toisistaan. Relaatiomalleissa mallin piirustusten, piirteiden, kappaleiden, osien ja kokoonpanojen välinen vuorovaikutus toteutetaan esimerkiksi säännösten ja tarkastusten avulla (Salchner et al. 2016). Säännöstellä voidaan määrittää parametrien välisiä riippuvuussuhteita ja tarkastuksilla pystytään asettamaan rajoitteita parametrien muunneltavuudelle esimerkiksi mallin rikkoutumisen estämiseksi. Relaatiomallien luominen on mahdollista kaikissa nykyaikaisimmissa CAD-järjestelmissä.

Siirryttäessä seuraavalle tasolle CAD-integroituihin suunnitteluautomaatiomenetelmiin *engl. CAD integrated automation methods* (Kuva 4) tarvitaan CAD-ohjelmistoon linkitettyä ulkoista ohjelmaa (Salchner et al. 2016). Näissä tapauksissa relaatiomallin toiminnallisuus sisällytetään KBE-menetelmiä hyödyntäen tuotemalliin, joka sisältää rajoitteet olemassa olevan 3D-mallin muunneltavuudelle ja konfiguraatiovalinnoille. Tuotekonfiguraattoreihin lisättävät CAD-automaatio-ominaisuudet edustavat usein tämän tason automaatiota. Kaupallisia CAD-integroituja suunnitteluautomaatiomenetelmiin perustuvia järjestelmiä ovat esimerkiksi Knowledge Fusion, CATIA Knowledgeware, CADEC Works, KBE-Works ja Tacton Design Automation (Salchner et al. 2016).

CAD-integroituja suunnitteluautomaatiomenetelmiä edistyksellisempää tasoa edustavat CAD-pohjaiset KBD-automaatiomenetelmät *engl. CAD based knowledge-based design automation methods* (Kuva 4). Ne mahdollistavat integroidun kehitysympäristön eli IDE:n *engl. Integrated Development Environment* kuten Visual Studio tai Eclipsen käytön

(Salchner et al. 2016). IDE:n avulla voidaan kehittää CAD-järjestelmästä irrallaan toimivia suunnitteluautomaatiotyökaluja, jotka sisältävät muun muassa (Salchner et al. 2016):

- kustomoituja graafisia käyttöliittymiä
- integraatioita muihin ohjelmistoihin (esim. Microsoft Office -sovellukset)
- ohjelmointi-kirjaston perustuen olio-ohjelmointiin
- CAD-ohjelmistosta riippumattoman ohjelmointikielen
- johdonmukaisen tuotekehitysympäristön sekä
- mahdollisuuden jatkuvalle ohjelmistokehitykselle.

Lisäksi tuotteen suunnitteluun liittyvä tietotaito pyritään sisällyttämään relaatiomallien ja muiden CAD-tiedostojen sijaan CAD-järjestelmän ulkopuolisiin tietokantoihin (Salchner et al. 2016) tuotemallin käytettäväksi. Näin ollen tuotteen suunnittelutieto voidaan jakaa helpommin kollegojen ja muiden suunnitteluosastojen kesken (Salchner et al. 2016). Näissä tapauksissa CAD-ohjelmistoa käytetään suunnitteluautomaatilla luodun konstruktion automaattiseen visualisointiin ja tuotantodokumenttien luomiseen.

Tämänhetkiseksi CAD-automaation korkeimmaksi tasoksi voidaan kutsua poikkijärjestelmäisiä multi-CAD -automaatiomenetelmiä *engl. cross-system multi CAD automation methods* (Kuva 4), jotka pystyvät tukemaan erilaisia yrityksen käyttämiä CAD-järjestelmiä (Salchner et al. 2016). Kyseisissä järjestelmissä tuotetieto on täysin erkaannutettu CAD-järjestelmästä ja se on nähtävillä kaikille suunnittelijoille yrityksen sisällä (Salchner et al. 2016). Geometrinen data tulee sisällyttää sellaisessa muodossa, jotta kaikki käytettävät järjestelmät pystyvät sitä käsittelemään. Vaikeutta lisää datan siirto ohjelmointirajapinnan eli API:n *engl. Application Programming Interface* yli CAD-järjestelmään, kun jokaisen järjestelmän API-rajapinta on omanlaisensa (Salchner et al. 2016). Lisäksi tuotetieto ja suunnittelusäännöstö tulee kerätä tuotemalliin hyvin tarkkaan ja sitä tulee arvioida eri käyttäjien ja järjestelmien näkökulmasta. Tällaisten järjestelmien luomiseen vaadittava työmäärä on melko korkea erityisesti järjestelmän kehityksen alkuvaiheessa (Kuva 4) (Salchner et al. 2016).

2.2.2 3D-mallin muunneltavuus

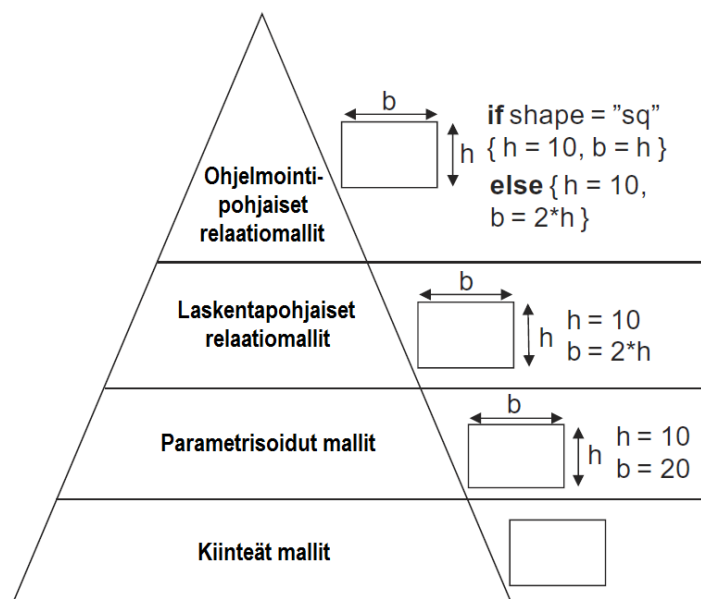
Suunnitteluautomaatilla käsiteltävien 3D-mallien muunneltavuuden tulee kasvaa sitä mukaa, kun suunniteltavan tuotteen varioituvuus ja sitä kautta CAD-automaation monimutkaisuus kasvaa. Yksinkertainen tapa lähestyä suunnitteluautomaatiota on emomallipohjainen suunnitteluautomaatio, jossa tuotteen kaikki eri variaatiot sisällytetään yhteen 3D-malliin, jota kutsutaan emomalliksi. Emomallista pystytään tuottamaan 3D-malleja yksittäiselle tekemällä käyttäjän haluamia valintoja tuotteelta haluttavien ominaisuuksien mukaan. Tätä kutsutaan konfiguroinniksi, johon tutustutaan tarkemmin luvussa 2.2.3.

3D-mallien morfologiset eli mallin piirteiden muotoon, sijaintiin ja geometriaan liittyvät tasot voidaan jakaa neljään eri luokkaan (Kuva 5) (Amadori et al. 2012):

1. kiinteät mallit
2. parametrisoidut mallit
3. laskentapohjaiset relaatiomallit
4. ohjelmointipohjaiset relaatiomallit.

Morfologisen malliautomaation alhaisin taso on kiinteät mallit (Kuva 5). Kiinteät mallit ovat 3D-malleja, joiden ei ole tarkoitus muuttaa muotoaan. Geometriat mitoituksineen ovat ennalta määritettyjä ja malli on staattinen. Kiinteillä malleilla ei ole automaatiota kehittävää arvoa emomallipohjaisissa suunnitteluautomaateissa, sillä kiinteitä malleja voidaan ainoastaan monistaa uusiokäyttöön. (Amadori et al. 2012.)

Parametrisoiduilla malleilla tarkoitetaan 3D-malleja, joiden mitoitus ja geometria on luotu siten, että käyttäjä pystyy syöttämään valittuja lähtöarvoja 3D-mallille. Parametrisoitu malli mukautuu syötettyjen lähtöarvojen mukaisiksi ja täten parametrisoidun mallin tuloste ei ole vakio ja malli on dynaaminen. Kyseisen tason malli ei kuitenkaan sisällä yhteyksiä eri mittojen tai geometrioiden välillä, vaan syöttöarvoilla ohjataan vain sitä mittaa, mihin syöttöarvo on linkitetty. (Amadori et al. 2012.) Hyvin parametrisoitu malli on alkeellinen malliautomaatti, jolla pystytään automatisoimaan mallien luominen ainoastaan hyvin yksinkertaisiin tuotteisiin.



Kuva 5 Morfologisen malliautomaation tasot (Amadori et al. 2012, mukaillen)

Parametrisoituihin malleihin voidaan lisätä mittojen keskenäisiä riippuvuussuhteita, jolloin siirrytään morfologisen malliautomaation kolmannelle tasolle laskentapohjaisiin relaatiomalleihin (Kuva 5). Laskentapohjaisissa relaatiomalleissa parametrit ovat matemaattisesti kytketty toisiinsa (Amadori et al. 2012). Tällä tavoin voidaan tehokkaasti vähentää syöttöarvojen määrää (Amadori et al. 2012) ja tuottaa automaattisesti esimerkiksi geometrialtaan samanmuotoisena pysyvä malli tuotteesta eri kokoisena. Relaatiot ovat kuitenkin täysin matemaattisiin yhtälöihin ja käyttäjän syöttämiin lähtöarvoihin sidottuja (Amadori et al. 2012).

Ohjelmointipohjaiset relaatiomallit ovat emomallipohjaisten suunnitteluautomaattien malliautomaation korkein taso (Kuva 5). Niihin voidaan sisällyttää insinööritietoutta KBE-menetelmien avulla, jolloin pelkän malliautomaation sijaan voidaan kiistatta puhua suunnitteluautomaatiosta. Monimutkaisissa ohjelmointipohjaisissa relaatiomalleissa tulee luoda tuotemalli irralliseen tietokantaan suunnittelusäännösten ylläpidon ja tarkastelun mahdollistamiseksi (Amadori et al. 2012). Laskentapohjaiset ja ohjelmointipohjaiset relaatiomallit ovat molemmat sääntöpohjaisia malliautomaatteja, mutta jälkimmäiset

mahdollistavat loogisen päättelyn sisällyttämisen malleihin (Amadori et al. 2012), minkä vuoksi niitä voidaan kutsua suunnitteluautomaateiksi yksinkertaisempien geometrisiin ominaisuuksiin keskittyvien malliautomaattien sijaan.

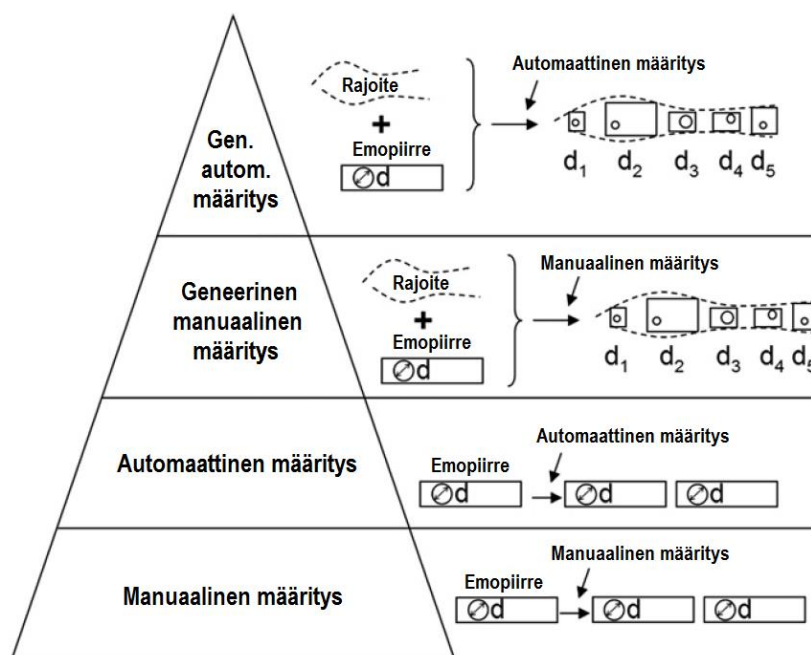
Morfologisten muutosten lisäksi 3D-malliin tai kokoonpanoon voidaan tehdä topologisia muutoksia, joilla tarkoitetaan piirteiden tai muiden kohteiden sijaintiin liittyviä muutoksia mallissa (Amadori et al. 2012). Topologisia muutoksia mallissa voivat olla (Amadori et al. 2012):

- instanssin lisääminen: piirre tai kohde asetetaan haluttuun paikkaan mallissa
- instanssin poistaminen: piirre tai kohde poistetaan valitusta paikasta
- instanssin korvaaminen: piirre tai kohde korvataan toisella piirteellä tai kohteella.

Topologisilla muutoksilla voidaan muuttaa mallissa olevien piirteiden lukumäärää tai olemassaoloa (Amadori et al. 2012). Topologisen muutoksen kuvaamisessa tärkeitä termejä ovat emopiirre, rajoite ja konteksti. Emopiirteellä tarkoitetaan alkuperäiseen 3D-malliin eli emomalliin kuuluvaa piirrettä tai osaa, joka halutaan määrittää uudelleen. Emopiirteitä poistetaan, korvataan tai monistetaan, jolloin emomallista saadaan luotua tietyt vaihtoehdot sisältävä kokonaisuus eli instanssi. Rajoitteet ovat ehtoja, jotka instanssien tulee täyttää, ja kontekstilla tarkoitetaan mallin geometrista ympäristöä, johon rajoitteet viittaavat (Amadori et al. 2012). Kuvassa 6 esitettävä pyramidi esittää topologisten muutosten automaation neljä tasoa (Amadori et al. 2012):

1. manuaalinen määrittäminen
2. automaattinen määrittäminen
3. geneerinen manuaalinen määrittäminen
4. geneerinen automaattinen määrittäminen.

Manuaalisessa määrittämisessä emopiirre voidaan poistaa tai monistaa käsin, mikä on topologisen malliautomaation alhaisin taso (Kuva 6). Tehdyt muutokset eivät ole kontekstiriippuvaisia. (Amadori et al. 2012.) Manuaalisessa määrittämisessä ei hyödynnetä lainkaan automaatiota. Automaattisessa määrittämisessä emomalli on parametrisoitu siten, että suunnittelija pystyy määrittämään instanssin piirteiden olemassaolon ja lukumäärän syötearvoilla. Määritetyt instanssit kuitenkin noudattavat emomallia syötearvoille orjallisesti ilman älykkyyttä mukautua kontekstiinsa rajoitteiden puuttumisen vuoksi (Amadori et al. 2012).



Kuva 6 Topologisen malliautomaation tasot (Amadori & al. 2012, mukaillen)

Topologisten muutosten siirtyessä geneerisille automaation tasoille tuotemalliin tulee sisällyttää rajoitteita ja siten instanssien määrittäminen muuttuu kontekstiriippuvaiseksi (Kuva 6). Geneerisessä manuaalisessa määrittäyksessä tuotemalli sisältää toimintaohjeen instanssien muodostamiseksi rajoitteiden mukaan emomallista. Tällainen määrittely mahdollistaa mallipohjan määrittämisen eri konteksteihin, jolloin 3D-mallin uudellenkäyttömahdollisuudet kasvavat. Geneerisen automaattisen määrittäksen taso saavutetaan, kun instanssin piirteiden lisääminen, poistaminen tai korvaaminen tapahtuu automaattisesti eri kontekstien asettamien rajoitteiden mukaisesti. Esimääritetyt funktiot mahdollistavat ohjelmiston kyvykkyyden suorittaa tarvittavat toimenpiteet instansseille käyttäjän syöttöarvojen mukaan. Kontekstista riippuvaiset rajoitteet takaavat, että instanssi on sopiva kaikkiin vaadittuihin konteksteihin ja lopputulos on järkevä. Geneerisessä automaattisessa määrittäyksessä instanssit ovat kontekstiriippuvaisia sekä pystyvät muuntumaan parametrisesti. Tällöin on saavutettu korkein mahdollinen topologisen automaation taso (Kuva 6). (Amadori et al. 2012.)

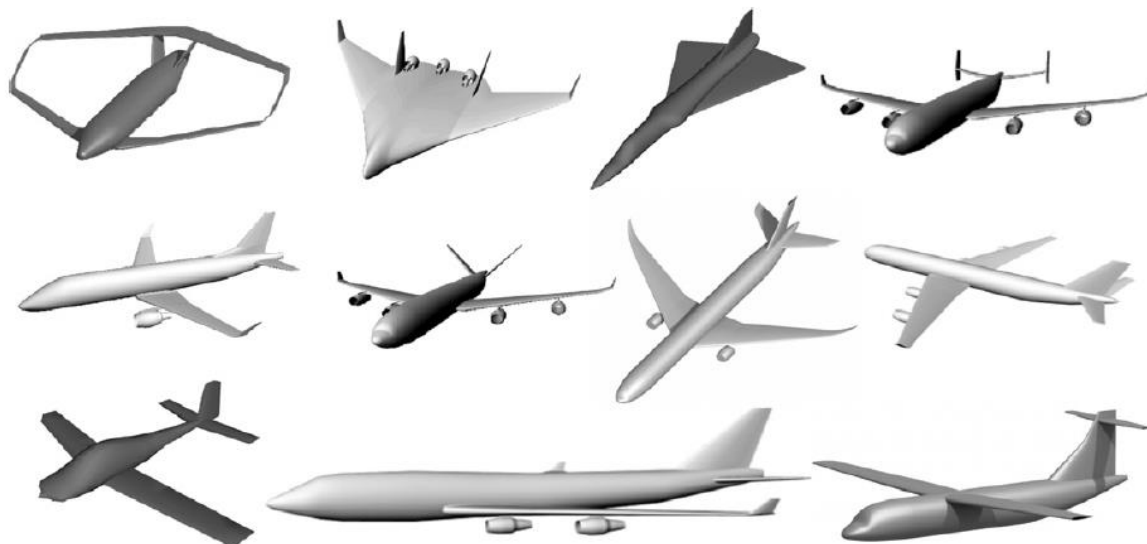
Perinteisesti CAD-suunnittelu on jaettu top-down- ja bottom-up-meneteltytapoihin (Amadori et al. 2012). Bottom-up-meneteltytavalle on tyypillistä, että kaikki peruselementin mallinnetaan erikseen yksityiskohtaisesti ja sen jälkeen ne kasataan yhdeksi kokoonpanoksi. Tällaisessa mallinnustavassa ei ole kontekstiriippuvuutta osien välillä, jolloin lopullisen kokoonpanon geometrian muokkaaminen voi olla vaikeaa erityisesti laajoissa kokoonpanoissa (Amadori et al. 2012). Täten bottom-up-menetelmä ei ole suunnitteluautomaation kannalta parhaiten sopiva vaihtoehto varsinkaan niissä tapauksissa, joissa vaaditaan geometrioiden optimisointia (Amadori et al. 2012). Todellisessa optimoivassa suunnitteluautomaatiossa kokoonpanon komponenttien muoto, sijainti ja lukumäärä tulee olla muunneltavissa (Amadori et al. 2012). Halutun dynaamisuuden vuoksi emomallin luominen tulee aloittaa kokoonpanon suunnittelusta luomalla eri komponenteille riippuvaisuuksia toisistaan. Tällaista meneteltytapaa kutsutaan top-down-mallinnukseksi, josta lisää luvussa 3.1. Top-down-mallinnukseen hyödyllinen työkalu on esimerkiksi PTC Creo -CAD-ohjelmiston skeleton-tekniikka.

2.2.3 Konfigurointi

CAD-automaatio perustuu olemassa olevan emomallin tai -piirustuksen automaattiseen muokkaamiseen eli konfigurointiin automaatin ajon aikana. Tarkemmin määriteltynä konfiguroinnilla tarkoitetaan suunnitteluaktiviteettia, jossa suunniteltava tuote kasataan ennalta määritellyistä osavaihtoehtoista, jotka voivat mukautua niille asetettujen sääntöjen mukaisesti (Felfernig 2014, s. 3). Parametrinen 3D-kokoonpanojen konfiguroinnin automatisointiin on kaksi eri lähestymistapaa: kiinteisiin emomalleihin tai generatiivisiin emomalleihin perustuva automaatio. Kiinteisiin malleihin perustuvassa automaatiossa ei luoda uusia geometrioita tai osia, vaan yksittäinen 3D-malli tai mallin piirre joko lisätään tai piilotetaan kokonaisuudesta. Tämä tarkoittaa sitä, että emomallissa tulee olla kaikki mahdolliset piirteet valmiiksi luotuna, mikä monimutkaistaa emomallia huomattavasti. Toisaalta tuotemallin säännöstöön on huomattavan paljon helpompi luoda säännöt sille, kuinka jokin osa tai piirre poistetaan kuin luodaan. (Lad ja Rao 2014.)

Tyypillisesti konfiguraattoreilla tarkoitetaan juuri kiinteiden ennalta määritettyjen geometrioiden ja osien valintaan perustuvaa automaattia. Konfiguraattoreita, jotka eivät sisällä logiikkaa sallituille lopputuloksille eli instansseille kutsutaan primäärisiksi konfiguraattoreiksi (Aho 2008). Tällainen konfiguraattori on helppo ja nopea toteuttaa, sillä se sisältää vain vähän logiikkaa, eikä vaadi välttämättä tuotemallin rakentamista (Aho 2008). Konfiguraattorilla voidaan kuitenkin luoda uusia tuotekombinaatioita olemassaolevasta tuotekannasta ilman tarkastelua lopputuloksen laadusta tai järjellisyydestä, mikä on tuotesuunnittelussa riskialtista. Hieman enemmän logiikkaa ja toiminnallisuuksia sisältäviä konfiguraattoreita kutsutaan interaktiivisiksi konfiguraattoreiksi (Aho 2008). Ne pystyvät poissulkemaan ominaisuuksia käyttäjän aiemmin tekemien valintojen perusteella ja luomaan sen perusteella ainoastaan tuotemallin säännöstössä sallittuja lopputuloksia (Aho 2008). Tässä työssä vastaavat perinteiset konfiguraattorit jätetään kuitenkin vähälle huomiolle ja pääasiassa keskitytään monimutkaisempiin generatiiviseen emomallin muokkaamiseen perustuviin suunnitteluautomaatteihin. Tulee kuitenkin huomioida, että samoja yksinkertaisista konfiguraattoreista löytyviä ominaisuuksia käytetään myös monimutkaisemmissa suunnitteluautomaateissa.

Tapauksissa, joissa ei haluta rajoittua emomallin ennalta määäämiin geometrioihin ja konfiguraatiovalintoihin voidaan käyttää generatiivisia suunnitteluautomaatteja. Generatiivisissa automaateissa emomallin geometria voi konfiguroinnin perusteella muokkautua merkittävästikin, sillä muutos geometriassa vaikuttaa kaikkiin siihen sidoksissa oleviin malleihin tai piirteisiin (Sandberg et al. 2011). Lentokoneteollisuus on autoteollisuuden ohella suunnitteluautomaation edelläkävijä (Amadori et al. 2012, La Rocca 2012). Kuvassa 7 on esitetty generatiivisella suunnitteluautomaatilla tuotettuja konseptimalleja lentokoneesta. Kaikki konseptimallit on konfiguroitu samasta lentokoneen emomallista tuotemallin sääntöjen mukaisesti antamalla automaatille erilaisia alkuarvoja (La Rocca 2012).



**Kuva 7 Esimerkkejä erilaisista lentokoneen emomallista konfiguroiduista lopputuloksista
(La Rocca 2012)**

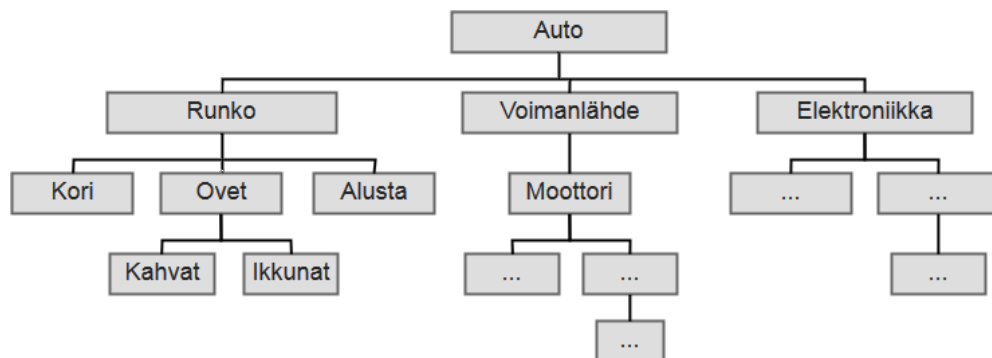
Tuotesuunnittelu on iteratiivinen prosessi (Mayr 2002, s. 26). Generatiivisen 3D-kokoonpanon konfiguroinnin lopputuloksena saadulle mallille voidaan suorittaa suunnitteluautomaatissa tarkasteluja CAE- tai CAM-ohjelman avulla (Amadori et al. 2012). CAE-ohjelmalla voidaan suorittaa esimerkiksi FEM- *engl. Finite Element Method* tai virtausanalyysijä, joista saatujen tulosten perusteella lopputulosta voidaan muokata iteratiivisesti optimaalisen geometrian löytämiseksi (Amadori et al. 2012). Täten suunnitteluautomaatiolla mahdollistetaan luvussa 2.1 esiteltyjen optimointityökalujen eli MDO-työkalujen hyödyntäminen tuotteen laadun parantamiseksi. Näin toimii esimerkiksi eräs turbiinimoottoreita tuottava yritys, joka siirtää Siemens NX -CAD-ohjelmistolla luodut 3D-mallit ANSYS-ohjelmaan FEM-analyysin suorittamiseksi (Lowe ja Hartman 2011). Kun optimointiin lisätään FEM-analyysijä on syytä huomioda, että automaatio lisää omat haasteensa. 3D-mallit tulee ensin siistiä FEM-analyysin vaatimaa verkotusta varten, mikä voi vaatia hyvinkin paljon mallin muokkaamista (Chapman ja Pinfold 2001). Mallin muokkaaminen verkotuksen mahdollistamiseksi voi täten olla tehokkaampaa manuaalisesti, sillä tarvittavan säännösten rakentaminen tuotemalliin työn automatisoinniksi vaatii monimutkaisissa tuotteissa suuren määrän työtä (Chapman ja Pinfold 2001).

2.3 Tuotetiedon hallinta ja varastointi

Tässä työssä käsiteltävien suunnitteluautomaattien kannalta tuotetieto voidaan jakaa kahteen osaan: tuotemalliin sisällytettävään tuotekehityksen suunnittelusäännöstöön, jonka perusteella tuote suunnitellaan sekä suunnittelusäännösten perusteella toteutettaviin nimikkeisiin ja niiden sisältämään tietoon. *Product data management* -järjestelmiä eli PDM-järjestelmiä käytetään muun muassa nimikkeiden ja niiden sisältämän insinööritiedon, eli tuotteen yksilöintitiedon, osaluettelon, 3D-mallien, valmistuspiirustusten sekä tuotteen toiminnan ja valmistuksen kannalta muiden oleellisten tietojen, kuten materiaalin ja painon luomiseen, hallintaan ja varastointiin (Peltonen 2000). Tehokkaan toiminnan mahdollistamiseksi suunnitteluautomaatin tulee pystyä hyödyntämään tätä PDM-järjestelmien sisältävää tietoa (Aho 2008). Tässä kappaleessa käsitellään suunnitteluautomaatioon liittyvää tuotetiedon hallintaa ja varastointia PDM-järjestelmien näkökulmasta ja esitellään suunnitteluautomaation kannalta oleellisin PDM-järjestelmien terminologia.

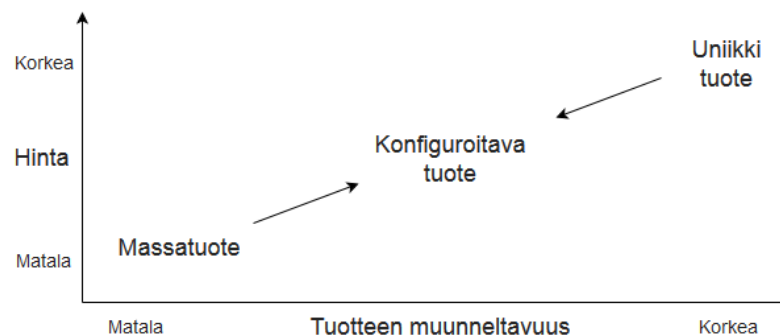
2.3.1 Tuote ja nimikkeet

Tuote käsitteenä on monitulkintainen, joten sitä on syytä täsmentää. Tässä työssä tuotteella tarkoitetaan sitä kokonaisuutta, jota yritys tuottaa ja myy asiakkaalleen. Tuotetta voidaan tarkastella hierarkisena rakenteena, joka koostuu useista eri osista eli komponenteista Kuvan 8 esimerkin mukaisesti (Peltonen 2000). Monessa tapauksessa tuote voi olla myös toisen tuotteen komponentti. Kuvitellaan esimerkkinä autoa, jonka asiakas ostaa autokaupasta. Myytävä tuote on ostettava auto, joka koostuu monista komponenteista, kuten moottorista. Toisaalta moottori nähdään myytävänä tuotteena moottorivalmistajan näkökulmasta. Lisäksi voidaan pohtia, onko kaksi keskenään identtistä autoa sama tuote? Tässä työssä tuotekehityksen näkökulmasta keskenään samanlaiset fyysiset yksilöt määritellään samaksi tuotteeksi. Samasta tuotteesta muokatut variantit käsitetään kuuluvaksi samaan tuotesarjaan ollen kuitenkin eri tuotteita.



Kuva 8 Hierarkinen tuoterakenne (Chapman ja Pinfold 2001, mukaillen)

Konfiguroinnin ja siten suunnitteluautomaation kannalta parhaiten sopiva tuote on sellainen, josta tuotetaan suuria määriä erilaisia variaatioita (Kuva 9) (Tiuhonen ja Soininen 1997). Tällaisissa tuotteissa samoja sarjasuunnittelutehtäviä joudutaan toistamaan useita kertoja, jolloin tehtävien automatisoinnilla on helpoiten saavutettavissa tehokkuutta tuotesuunnitteluun (Tiuhonen ja Soininen 1997). Sarjasuunnittelua tehostavaa suunnitteluautomaattia ei ole ymmärrettävästi järkevää rakentaa tuotteelle, joka suunnitellaan vain kerran, koska automaatin luomiseen kuluisi todennäköisesti enemmän aikaa kuin kerran suoritettavaan manuaaliseen suunnitteluun. Tällainen tuote voi olla täysin uniikki tuote tai muuttumaton massatuote (Kuva 9) (Tiuhonen ja Soininen 1997). Vaikka tuote ei ole sarjasuunnittelun konfiguroitava tuote, se ei kuitenkaan tarkoita, etteikö suunnitteluautomaatiolla voisi saavuttaa merkittäviä hyötyjä sen suunnittelussa. Näihin hyötyihin palataan tarkemmin luvussa 2.4.



Kuva 9 Konfiguroitavat tuotteet sarjasuunnittelun näkökulmasta (Tiuhonen ja Soininen 1997, mukaillen)

Tuotteesta luotavalla nimikkeellä tarkoitetaan tietokokonaisuutta, jota tuotteesta tai sen yksittäisestä komponentista hallitaan PDM-järjestelmässä (Peltonen 2000). Nimikkeellä voidaan joissain yhteyksissä tarkoittaa myös yksittäistä dokumenttia, joka on tuotu PDM-järjestelmän hallittavaksi (Peltonen et al. 2002, s. 10) mutta tässä työssä dokumentit käsitellään nimikkeiden sisältäminä tuotetiedon osina ja niitä käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.2. Tuotteesta konfiguroidut variaatiot vaativat oman nimikkeensä PDM-järjestelmässä, koska niiden sisältö ei ole keskenään identtinen.

Tyypillinen nimike koostuu vähintään tuotteen yksilöintitiedoista, osaluettelosta, attribuuttitiedoista ja dokumenteista (Peltonen 2000). Nimikkeen yksilöintitiedot sisältävät vähintään yksiselitteisen tunnisteen, jota voidaan kutsua myös nimikkeen koodiksi (Peltonen et al. 2002, s. 16). Tunniste voi olla joko luokitteleva tai ei-luokitteleva. Luokitteleva tunniste itsessään kertoo nimikkeen ominaisuuksista. Ongelmaksi luokittelevaa tunnistetta käytettäessä tulee, että usein tunnisteseen joudutaan sisällyttämään nimikkeen ominaisuuksia, jolloin tieto ei voi enää muuttua tai nimikettä joudutaan vaihtamaan. Ei-luokittelevassa nimikkeessä tätä ongelmaa ei ole, sillä tunnisteen luonti tehdään esimerkiksi juoksevilla numeroinnilla. Tällöin nimikkeille tulee lisätä kuvauksia nimikkeiden löytämisen mahdollistamiseksi PDM-järjestelmästä. (Peltonen et al. 2002, s. 17.) Ei-luokittelevassa nimikkeessä kuvauksen tulee sisältää tieto siitä minkä tyyppisen tuotteen nimike kattaa. Kuvausten ja tunnisteen luonnin tulee molemmissa tapauksissa olla yrityksen sisällä standardoituja (Peltonen et al. 2002, s. 17), jotta vältytään esimerkiksi useamman kuin yhden samaa tuotetta tarkoittavien eli duplikaattinimikkeiden luomiselta. Nimikkeellä voi olla myös useampia kuvauksia, joista osa on vapaamuotoisempia kuin toiset.

Nimikkeisiin liittyy määrämuotoisia tietoja, joita kutsutaan attribuuteiksi tai parametreiksi, joista tässä työssä käytetään ensimmäistä. Nimikkeille tulee määritellä aina joitain attribuutteja, joista osa on kiinteitä ja osa vapaita tietoja. Kiinteitä attribuutteja ovat tyypillisesti tunniste ja vakioitu kuvaus. Muita nimikkeelle määritettäviä attribuutteja voivat olla esimerkiksi materiaalitiedot tai tuotteen toiminnallisuuksiin ja käyttöolosuhteisiin liittyvät tiedot. Attribuuttitietojen kokonaisuutta kutsutaan usein metatiedoksi. Nimikkeitä voidaan jakaa nimiketyyppeihin, jolloin eri nimiketyypeille vaadittavat metatiedot voivat olla erilaisia. (Peltonen et al. 2002, s. 20.)

Yksi tärkeimmistä nimikkeen sisältämistä tiedoista on tuoterakenne, joka kertoo mistä komponenteista tuote koostuu (Peltonen et al. 2002, s. 60). Fyysinen komponentti voi olla atominen komponentti, kuten männän varsi, osista koostuva komponentti, kuten moottori, tai materiaali, kuten 5 litraa öljyä (Peltonen et al. 2002, s. 61). Tuoterakenne voi esittää tuotteen fyysisten komponenttien välisen hierarkian lisäksi esimerkiksi työvaiheita tai palveluita (Peltonen et al. 2002, s. 61). Nimikkeiden tuoterakenteet esitetään osaluetteloiden avulla (Peltonen et al. 2002, s. 62), joita kutsutaan usein myös BOM:ksi *engl. Bill Of Materials*. Osalista voi olla myös tyhjä esimerkiksi silloin, jos nimike sisältää esimerkiksi vain yksittäisen osan, jolla ei ole aihionimikettä. Osaluettelossa nimikkeille merkitään ainakin positiokoodi, komponentin tunniste, komponentin kuvaus ja määrä mittayksiköineen (Peltonen et al. 2002, s. 62). Positiokoodilla tarkoitetaan osanumeroa, jonka avulla komponentin sijainti tuotteessa voidaan esittää esimerkiksi kokoonpanopiirustuksessa. Kokoonpanopiirustuksia ja muita nimikkeille lisättäviä valmistusdokumenteja käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

2.3.2 Valmistusdokumentit ja revisiointi

Nykyään lähes kaikki yrityksissä laajassa käytössä olevat dokumentit luodaan tietokoneilla sähköisessä muodossa (Peltonen et al. 2002, s. 47). Dokumenttien tuottaminen ja muokkaaminen on helppoa, jolloin ongelmaksi muodostuu tietää, mistä tietty dokumentti löytyy, mikä on dokumentin viimeisin versio ja muokataanko dokumenttia parhaillaan (Peltonen et al. 2002, s. 47). Ongelman ratkaisemiseksi PDM-järjestelmillä voidaan hallita lähes kaikkia tietokoneilla tehtyjä dokumentteja, jotka on saatu tallennettua sopivaan tiedostomuotoon (Peltonen et al. 2002, s. 48). Tässä luvussa käsitellään kuitenkin ainoastaan CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien kannalta oleellisia dokumentteja eli valmistusdokumentteja.

Valmistusdokumenteilla tarkoitetaan tämän työn yhteydessä pääasiassa piirustuksia ja 3D-malleja. Piirustukset voivat olla mitä tahansa teknisiä piirustuksia, kuten koneistus- tai kokoonpanopiirustuksia. 3D-malleilla tarkoitetaan sekä yksittäisistä osia kuvaavia 3D-malleja että 3D-kokoonpanoja. Emomallien ja -piirustusten muokkaamiseen perustuvien CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien tapauksessa on myös tärkeää, että automaatin tuottamien dokumenttien lisäksi myös emodokumentit pystytään noutamaan olemassa PDM-järjestelmästä, mikä vaatii tiedon kulkua molempiin suuntiin automaatin ja tietovarastona toimivan PDM-järjestelmän välillä (Aho 2008). Suunnitteluautomaateilla voidaan luoda myös esimerkiksi suunnitteluraportteja teksti- tai taulukkotiedostona (Lad ja Rao 2014), jotka luetaan myös kuuluviksi valmistusdokumentteihin. PDM-järjestelmissä sama dokumentti voi olla linkitettyä useaan nimikkeeseen (Peltonen et al. 2002, s. 48), mikä aiheuttaa tiettyjä haasteita suunnitteluautomaatin toteuttamisessa. Kun sama dokumentti linkitetään useille nimikkeille, automaatin tuotemalliin tulee lisätä logiikka siitä, milloin kutakin dokumenttia käytetään. Lisäksi siinä tapauksessa, jos dokumenttia koskevan muutoksen tapahtuessa myös nimikettä halutaan muokata, automaatin tulee muistaa mille nimikkeille kutakin dokumenttia on käytetty.

Jos dokumentteja tai nimikkeitä muokatessa niistä luodaan uusia versioita siten, että uusi versio korvaa vanhan syntyy uusi revisio (Peltonen et al. 2002, s. 33). Aktiviteettia kutsutaan yritysmaailmassa tyypillisesti revisioinniksi ja revisioiden luominen sekä hallinta on yksi PDM-järjestelmän tärkeimpiä tehtäviä (Peltonen et al. 2002, s. 32). Syitä tuotteiden revisioinnille teollisuusyrityksissä ovat esimerkiksi (Peltonen et al. 2002, s. 34):

- tuote ei toimi tyydyttävästi
- tuotannossa on ongelmia (esim. liian tiukat toleranssit)
- muutoksia tuotantomenetelmissä
- suorituskyvyn parantaminen
- kustannusten madaltaminen
- muutokset osien saatavuudessa
- markkinoiden vaatimat lisäominaisuudet tuotteeseen
- muutokset standardeissa tai viranomais määräyksissä.

Suunnitteluautomaatin tehokkaan käytön mahdollistamiseksi koko tuotteen elinkaaren ajan on suunnitteluautomaatin syytä sisältää mahdollisuus revisioiden tuottamiseen ja hallintaan. Revisiointin sisällyttämistä kaupallisiin KBE-järjestelmiin vaikeuttaa kuitenkin yritysten erilaiset toimintatavat revisioiden tuottamisessa ja hallinnassa. Tästä huolimatta joistakin KBE-järjestelmistä löytyy valmiita ominaisuuksia myös revisiointiin.

2.4 Suunnitteluautomaattien hyödyt yritykselle

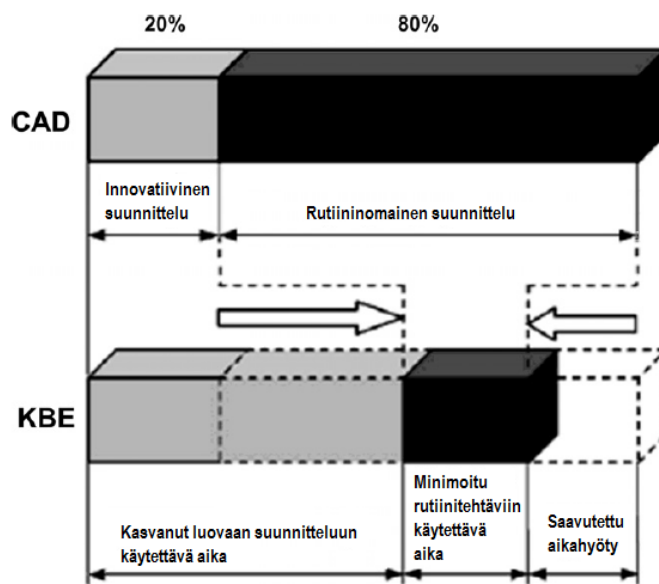
Menestyvien yritysten tulee tehostaa ja virtaviivaistaa heidän tietoteknisiä järjestelmiään kilpailukykyä ylläpitämiseksi (Felfernig 2014, s. 31). Lean on nykyisin länsimaissa teollisuudessa yleisesti tunnettu käsite, joka on kehitetty kuvaamaan Toyotan kehittämää ja myöhemmin teollisuuden mullistanutta tuotantojärjestelmää ja -filosofiaa (Modig ja Åhlström 2013, s. 78). Käsitettä lean käytti ensimmäisen kerran John Krafcik artikkelissaan ”Lean – tuotantojärjestelmän riemuvoitto”, joka julkaistiin vuonna 1988 Sloan Management Review -lehdessä (Modig ja Åhlström 2013, s. 78). Sitten leanista on julkaistu lukuisia kirjoja ja artikkeleita opastamaan, kuinka yritykset voivat tehostaa toimintaansa. Lean-filosofia korostaa erityisesti prosessien virtaustehokkuuden kasvattamista ja sen kautta läpimenoaikojen lyhentämistä. Prosesseilla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla virtausyksiköitä viedään eteenpäin (Modig ja Åhlström 2013, s. 19). Virtausyksikkö voi olla materiaalia, informaatiota tai ihmisiä (Modig ja Åhlström 2013, s. 19). Prosessien virtaustehokkuuden kasvattamista vastustavat kolme prosessilakia (Modig ja Åhlström 2013, s. 44):

- Littlen laki: läpimenoaika kasvaa sen mukaan, montako keskeneräistä virtausyksikköä prosessissa on ja miten pitkä jaksoaika on.
- Pullonkaulojen laki: pisteet prosessissa, jotka muodostavat jonoja kasvattavat läpimenoaika.
- Vaihtelun vaikutuksen laki: läpimenoaika kasvaa sen mukaan, kuinka suurta vaihtelua prosessissa on.

Läpimenoajalla tarkoitetaan aikaa, joka virtausyksiköltä kuluu sen edetessä prosessin alkupisteestä loppupisteeseen (Modig ja Åhlström 2013, s. 22). Jaksoaika taas on kahden virtausyksikön prosessista poistumisen välillä kuluva keskimääräinen aika (Modig ja Åhlström 2013, s. 35). Suunnitteluautomaatiolla voidaan vaikuttaa mainituista haasteista jokaiseen, sillä automatisoinnilla voidaan vähentää merkittävästi suunnitteluprosessin jaksoaika ja prosessin vaihtelua voidaan merkittävästi vähentää kun suunnittelu sekä dokumentaatio toteutetaan vakioidulla menetelmällä. Lisäksi suunnittelu on tyypillinen pullonkaula prosessiteollisuudessa lisäten läpimenoaika asiakkaan tilauksen vastaanottamisesta valmiin tuotteen lähettämiseen päivillä, viikoilla tai jopa kuukausilla.

2.4.1 Tehokkuus

Suunnitteluautomaation päätavoitteena on tehostaa tuotesuunnittelua, eli vähentää siihen käytetyn ajan ja rahan määrää, mikä saavutetaan pääasiassa automatisoimalla itseään toistavia työtehtäviä (Verhagen et al. 2012). Pelkästään perinteisiä CAD-menetelmiä hyödyntävien yritysten suunnittelutehtävissä jopa 80% ajasta käytetään rutiininomaisten työtehtävien suorittamiseen (Verhagen et al. 2012). Suunnittelun rutiininomaisia tehtäviä esiintyy esimerkiksi tuotteen nimikkeiden, 3D mallien, teknisten piirustusten ja suunnitteluraporttien luonnissa sekä iteratiivisten laskentojen toteuttamisessa. Suunnittelutyön tehostamisessa avainroolissa on aiemmin tehdyn työn uudelleenkäyttö (Wang et al. 2008), mikä KBE-järjestelmien avulla voidaan toteuttaa automatisoidusti (Verhagen et al. 2012). KBE-järjestelmien tuotemalleihin sisällytetyn uudelleenkäytettävän tiedon kautta rutiininomaiset tehtävät pystytään minimoimaan, mikä lyhentää suunnitteluprosessiin käytettävää aikaa ja lisäksi antaa suunnittelijoille enemmän aikaa luovaan ja enemmän arvoa tuottavaan työhön (Trehan et al. 2015). Kuvan 10 diagrammi havainnollistaa kyseistä suunnitteluautomaattien vaikutusta suunnittelutehtäviin.



Kuva 10 Suunnitteluautomaation muutokset suunnittelutyöhön (Verhagen et al. 2012, mukailen)

Suunnitteluautomaation selkeimpänä hyötynä voidaan nähdä nimenomaan suunnittelutyön nopeutuminen (Lowe ja Hartman 2011). Tutkimukset ovat osoittaneet, että CAD-integroiduilla suunnitteluautomaateilla voidaan vähentää yrityksen suunnittelutyöhön kuluvaan aikaan jopa 90 prosentilla (Willner et al. 2016). Parhaimmissa tapauksissa yksittäinen useita tunteja ja jopa päiviä vaativa suunnittelutyö voidaan toteuttaa automatisoidusti muutamissa minuuteissa (Felfernig 2014, s. 217). Näin tapahtui esimerkiksi sementti-tehtaiden tarvikkeita tuottavan FLSmidthin toteuttamalla CAD-integroidulla suunnittelu-automaatilla (Felfernig 2014, s. 217), jossa hyödynnettiin Tacton Design Automation -ohjelmistoa integroituna SolidWorksin kanssa automaattisen tuotekonfiguroinnin ja valmistusdokumenttien toteuttamiseen (Felfernig 2014, s. 213). Kun yksittäisten suunnittelutehtävien jaksonaikaa saadaan lyhennettyä, yritys voi tehdä merkittäviä säästöjä suunnittelutyön vaatimissa henkilöstökustannuksissa (Felfernig et al. 2014, s. 30).

Leanin metodit ovat nykyisin yritysmaailmassa yksi käytetyimmistä ja toimivimmaksi osoitetuista tekniikoista yrityksen tehokkuuden parantamiseen (Modig ja Åhlström 2013). Leanin oppien mukaan tehokkuus kasvaa, kun kaikki prosessin läpi virtausta hidastavat tekijät minimoidaan (Modig ja Åhlström 2013, s. 75). Virtausta hidastavat tekijät ovat tehottomuuden eli hukan muotoja, jotka eivät tuota arvoa asiakkaalle tai tuotteelle (Modig ja Åhlström 2013, s. 75). Hukan muotoja ovat liikatuotanto, odotusajat, tarpeeton tuotteiden ja materiaalin kuljetus, ylilaatu, tarpeeton varastointi, tarpeettomat työntekijöiden liikkeet sekä tarpeettomat virheet, työn tekeminen uudelleen tai päällekkäinen työ (Modig ja Åhlström 2013, s. 75). Näistä suunnitteluautomaatin käytöllä voidaan karsia erityisesti tarpeettomia, mutta inhimillisiä suunnittelijoiden tekemiä virheitä, aiemmin tehdyn työn uudelleen tekemistä ja päällekkäistä työtä sekä ylilaatua. Voimakkaimmin suunnittelu-automaattien kasvattama tehokkuus näkyy yrityksissä, jotka suunnittelevat tuotteitaan tilauskohtaisesti asiakasvaatimukseen perustuen (Willner et al. 2016). Näille ETO-tuotteiden *engl. Engineer-to-Order* suunnitteluun perustuvissa yrityksissä suunnitteluautomaattien käyttö on kilpailukyvyyn kannalta äärimmäisen hyödyllistä ja tulevaisuudessa jopa välttämätöntä (Willner et al. 2016).

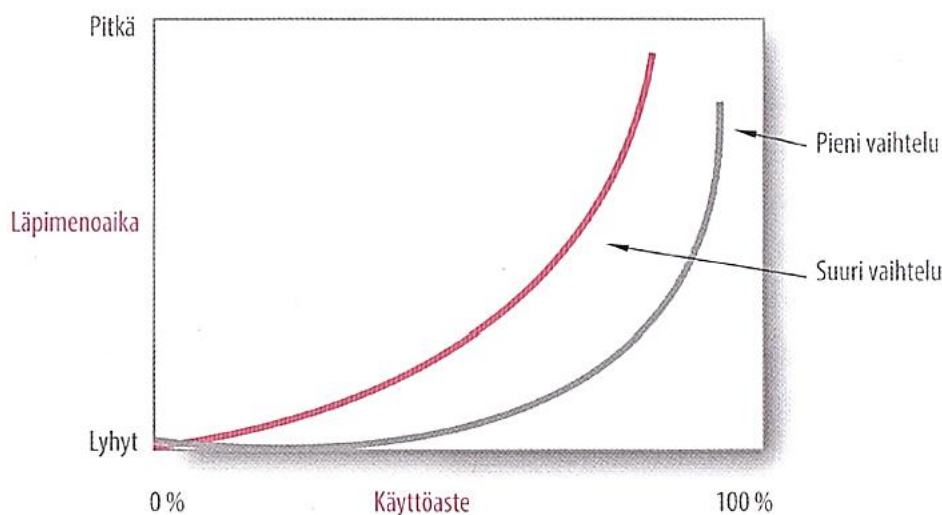
Leanin mukaan yrityksen menestyksen avaintekijä on tehokkuuden lisäksi työntekijöiden motivoituneisuus sekä työntekijöiden ja siten koko yrityksen jatkuva oppiminen (Modig ja Åhlström 2013). Suunnitteluautomaateilla automatisoidaan tehtäviä, jotka eivät vaadi suunnittelijalta merkittävää luovuutta (Amadori et al. 2012). Kuvan 10 diagrammista nähdään, kuinka luovan työn osuus kasvaa merkittävästi KBE-järjestelmien käyttöönoton myötä. Tärkeä suunnitteluautomaation tavoite onkin antaa suunnittelijoille mahdollisuus työskennellä korkeammalla abstraktion tasolla vaativampien tehtävien parissa, kun esimerkiksi yksinkertaisten CAD-toimintojen, kuten pisteiden, viivojen ja pursotusten luomisen tarve on minimoitu automaatin avulla (Amadori et al. 2012). Näin ollen voidaan olettaa suunnittelijoiden olevan myös motivoituneempia työhönsä ja he pystyvät kehittämään itseään helpommin työn parissa, kun työtehtävät ovat perinteistä suunnittelutyötä vaihtelevampia. Vaihtelevat työtehtävät mahdollistavat samalla työntekijöiden osaamisen laajenemisen ja siten yrityksen jatkuvan kehittymisen. Lisäntyneen osaamisen kautta on mahdollista parantaa myös tuotteen laatua, mihin perehdytään tarkemmin luvussa 2.4.3.

2.4.2 Standardointi

Lean sisältää filosofiansa lisäksi useita työkaluja ja menetelmiä yrityksen toiminnan kehittämiseksi. Yksi menetelmistä on vakiointi eli standardointi, jota Toyota käyttää runsaasti toiminnassaan (Modig ja Åhlström 2013, s. 93). Suunnitteluautomaatin avulla pystytään vakioimaan niin tietoa, työtä kuin työn tuloksiakin. Ajan tasalla olevan suunnittelutiedon jakaminen yrityksen sisällä on välttämätöntä tasaisen laadun ylläpitämiseksi ja toiminnan kehittämiseksi (Felfernig 2014, s. 31). Nykyään tämä on erityisen tärkeää, kun työntekijöiden kasvavana trendinä on työpaikan vaihtaminen yrityksestä toiseen useasti uran aikana (Cheok ja Nee 1998). Yrityksen pitkäaikaisen ja menestyksekkään toiminnan elinehto on, että suunnitteluosaaminen ja -tieto pystytään keräämään vakioidussa ja uudelleenkäytettävässä muodossa uusien insinöörien kouluttamiseen, jolloin yrityksen kriittistä ydinosaamista ei pääse liiaksi poistumaan yksittäisen työntekijän mukana (Cheok ja Nee 1998). Tuotemallin rakentaminen suunnitteluautomaattia varten on yksi tapa varmistaa, että osaaminen ja tieto säilyy yrityksessä. Tuotemallin luominen vaatii suuren määrän vakioidun tuotetiedon ja säännösten keräämistä ja varastointia sähköiseen muotoon, minkä myötä tieto on jaettavissa kaikkien suunnittelijoiden kesken. Tällöin niin uusilla kuin vanhoillakin suunnittelijoilla on käytettävissään samat mahdollisuudet säännösten tutkimiseen ja tulkintaan omassa työssään. Tiedon jakaminen yrityksen sisällä on kriittistä myös tilausten laadun ylläpitämiseksi sekä läpimenoajan laskemiseksi (Felfernig 2014, s. 31).

Suunnittelutyön osalta automaateilla pystytään standardoimaan erityisesti yrityksen rutiininomaisia työtehtäviä, mikä tapahtuu vakioimalla työtoimintoja ja käytettäviä työkaluja. Menestyksekkäät yritykset virtaviivaistavat jatkuvasti tietoteknisiä järjestelmiään kilpailukyvyyn ylläpitämiseksi (Felfernig 2014, s. 31). Yritysten tuotesuunnittelussa ei ole harvinaista, että esimerkiksi sopivien komponenttien valintaan vaikuttavat laskentamallit ja -kaavat ovat toisistaan irrallisissa tietokannoissa ja laskentatoimenpiteet suoritetaan osittain kunkin suunnittelijan omiin kokemuksiin perustuen. Tällaiset laskentatehtävät ovat toistuvia ja aikaa vaativia toimenpiteitä (Lad ja Rao 2014), jotka ovat vakioitavissa tuotemallin suunnittelusäännöstöön. Laskentojen perusteella tuotteelle valitaan komponentteja aikaisempaan suunnittelijoiden kokemukseen perustuen (Lad ja Rao 2014). Valittuihin komponentteihin kuuluu usein standardiosia, aiemminkin käytettyjä valmiiksi suunniteltuja osia sekä myös uusia CAD-malleja ja piirustuksia vaativia komponentteja (Lad ja Rao 2014).

Tällaisten valintojen tulisi tapahtua standardoitujen valintaperusteiden mukaan, mikä on suunnitteluautomaation avulla toteutettavissa, jos selkeät valintaperusteet on olemassa ja kirjattavissa tuotemalliin (Lad ja Rao 2014). Lisäksi suunnitteluautomaattiin luodut toimintaprosessit vakioivat tehtävien suorittamista. Kuvan 11 diagrammi osoittaa, kuinka työn vakioinnilla voidaan vaikuttaa läpimenoaikaan. Esimerkkinä voidaan pitää ETO-tuotteita valmistavan yrityksen suunnitteluosastoa, jonka läpimenoajan mittaaminen alkaa siitä hetkestä, kun työ ilmestyy osaston työlistalle. Mittaaminen loppuu siihen hetkeen kun työ on valmis ja siirtyy tuotannon työlistalle. Kun töitä on vähän ja osaston käyttöaste on pieni, ilman toiminnan standardointia läpimenoaika voi olla hieman lyhyempi (Modig ja Åhlström 2013, s. 42). Tämä voi johtua esimerkiksi työntekijän ”ylimääräisestä” tarpeesta varmistaa, että hänen työnsä on vakioinnin mukaista. Käyttöasteen noustessa lähemmäs 100% eli täystyöllistystä läpimenoaika alkaa niin pienen kuin suuren vaihtelun osalta kasvaa syntyvän pullonkaulan takia (Kuva 11) (Modig ja Åhlström 2013, s. 37), sillä työ joutuu odottamaan aiemmasta työstä vapautuvaa suunnittelijaa. Nousu on molemmissa tapauksissa eksponentiaalista mutta pientä vaihtelua sisältävän eli vakioitun työn osalta läpimenoajan kasvu on huomattavasti maltillisempaa, jolloin läpimenoajat pysyvät pidempään lyhyinä vaikka käyttöaste kohoaa (Kuva 11) (Modig ja Åhlström 2013, s. 42).



Kuva 11 Vaihtelun ja käyttöasteen vaikutus läpimenoaikaan (Modig ja Åhlström 2013, s. 42)

Tiedon ja työn lisäksi suunnitteluautomaateilla pystytään standardoimaan työn lopputuloksia. Perinteisiä työmenetelmiä käytettäessä suunnittelijoilla voi olla tapana toteuttaa tuotteisiin erikoisratkaisuja, jotka ovat todellista tarvetta kustomoidumpia (Felfernig 2014, s. 218). Tarpeettomat erikoisratkaisut aiheuttavat lisäkustannuksia tuotteiden valmistuksessa ja siten vähentävät tuotteesta saatavaa voittoa, mikä vältetään tuotteen standardoidulla konfiguroinnilla suunnitteluautomaatin avulla (Felfernig 2014, s. 218). Lisäksi yrityksissä, joissa ei ole vakioituja toimintatapoja valmistusdokumenttien, kuten 3D-mallien ja piirustusten luontiin, niiden laatu ja uudelleenkäytettävyys voi vaihdella merkittävästikin suunnittelijasta riippuen. Emomallien ja -piirustusten muokkaamiseen perustuvissa automaateissa valmistusdokumentit voidaan tuottaa vakioiduista kertaalleen yrityksen hyvien käytäntöjen mukaisesti luoduista emodokumenteista. Dokumentteihin tehtävät muokkaukset suoritetaan samojen standardien mukaan, jolloin lopputuloksen pitäisi olla aina laadukas ja uudelleenkäytettävä. Lopputuloksena tuotetut dokumentit voidaan myös tallentaa standardoidussa muodossa, jolloin niitä voidaan hyödyntää helpommin esimerkiksi tuotannon tarpeissa (Trehan et al. 2015). Esimerkiksi ISO-standardi *engl.*

International Standards Organization määrittää 3D-mallien siirtoon vakioituksi tiedostotyyppiksi STEP-tiedoston. STEP-tiedostoja käytetään laajasti CAD-tiedon siirtoon neutraalissa muodossa eri ohjelmien välillä. Tiedostoihin voidaan lisätä geometrisen tiedon lisäksi muutakin koko tuotteen elinkaareen liittyvää tietoa. (Trehan et al. 2015.)

2.4.3 Laatu

CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien avulla tuotteiden laatua voidaan kehittää ominaisuuksien ja kilpailukyvyn parantamiseen liittyvin metodein sekä inhimillisiä virheitä poistavilla toiminnoilla. KBE-järjestelmät yhdistävät 3D-mallinnuksen, ohjelmoinnin ja tekoälyn mahdollisuuksia tarjoten kehitysalustan sellaiselle tuotesuunnittelulle, joka ei perinteisin suunnittelumenetelmin tai pelkkien CAD-ohjelmistojen avulla ole toteutettavissa (La Rocca ja van Tooren 2012). Lentokoneiden suunnittelussa painon minimointi on äärimmäisen tärkeässä osassa käyttökustannusten alentamiseksi. Lentokoneala onkin täten edelläkävijä suunnitteluautomaattien käytössä ja erityisesti MDO-työkalujen hyödyntämisessä optimaalisen tuotteen suunnittelemiseksi (Amadori et al. 2012, Corallo et al. 2009). Automatisoitujen optimointityökalujen hyödyntäminen voisi parantaa myös monen muunlaisten tuotteiden laatua muun muassa vähentämällä materiaalikustannuksia (Amadori et al. 2012). Tuotteen laadun parantamiseksi suoritettavaan ylimääräiseen iteraatio-kierrokseen kuluva aika pystytään vähentämään päivistä tai jopa viikoista minuutteihin, mikä madaltaa huomattavasti kynnystä optimointiin (Lowe ja Hartman 2011).

Luvussa 2.4.1 esiteltiin kuinka suunnitteluautomaatin avulla pystytään vapauttamaan suunnittelijoiden aikaa rutiininomaisista työtehtävistä luovempiin tehtäviin. Vapautunutta aikaa voidaan hyödyntää yrityksen tuotteiden ja toimintatapojen laadun tarkasteluun ja parantamiseen (Lowe ja Hartman 2011). CAD-integroiduilla suunnitteluautomaateilla toteutettavan suunnittelun lopputuloksena saadaan tyypillisesti ainakin 3D-kokoonpano konfiguroidusta tuotteesta (Mathew ja Rao 2010). 3D-kokoonpanoja hyödyntämällä tuotteen laadun tarkastelu helpottuu ja suunnittelijoiden on helpompi kyseenalaistaa tuotteen toiminnallisuutta. Lisäksi luovemmat työtehtävät ja rutiinitehtävistä vapautunut aika pakottavat työntekijät pohtimaan suunniteltavan tuotteen toimintaa ja laatua sekä omaa toimintaa entistä monipuolisemmin, mikä nopeuttaa leanin mukaista jatkuvaa oppimista. Yrityksissä, joissa näin toimitaan karttuu uutta osaamista, uutta ymmärrystä, uusia kokemuksia sekä uusia opetuksia asiakkaan tarpeista ja niiden mahdollisimman tehokkaasta tyydyttämisestä (Modig ja Åhlström 2013, s. 152).

Kuitenkin ehkäpä helpoiten huomattava tekijä suunnitteluautomaattien vaikutuksessa tuotteiden ja suunnittelun laatuun on inhimillisten virheiden väheneminen. Suunnitteluautomaattiin voidaan sisällyttää esimerkiksi rajoitteita, jotka automaattisesti tarkastavat suunnittelijan valitsemia konfiguraatioiden yhteensopivuuksia ja huomauttaa, jos valinnat eivät ole keskenään yhteensopivia (Felfernig 2014, s. 29). Vastaavilla tarkastuksilla voidaan vähentää huomattavasti inhimillisten virheiden osuutta konfigurointivaiheessa. Toisaalta virheitä tapahtuu myös esimerkiksi manuaalisessa 3D-mallien tai piirustuksen luomisessa. Automaatti toteuttaa dokumentit aina samalla tavalla, ja jos automaatin toimintalogiikka on pystytty osoittamaan toimivaksi, lopputuloksissa ei pitäisi ilmentyä poikkeamia. Jos automaatin tuottamissa dokumenteissa kuitenkin havaitaan toistuva virhe, sen korjaaminen on mahdollista huomattavasti manuaalisia menetelmiä nopeammin kunhan automaattia luodessa on huomioitu mahdollisuus revisioida dokumentteja esimerkiksi sarja-ajoilla. Sarja-ajoja hyödyntävillä suunnitteluautomaateilla voidaan myös parantaa tuotteiden laatua esimerkiksi silloin, jos yrityksen tuotteista löytyy niin suuri määrä variaatioita, että

manuaaliset muutokset olemassa olevan tuotekannan dokumentteihin olisi mahdotonta. Lisäksi, kun automaatilla tuotetaan tarkat 3D-mallit tuotteen kaikista komponenteista, niitä voidaan hyödyntää nykyaikaisissa valmistusmenetelmissä, kuten 3D-tulostuksessa (Piper 2015) tai CNC-koneistuksessa *engl. Computerized Numerical Control* (Su et al. 2015). CAM-ohjelmien avulla voidaan myös analysoida suunnitellun tuotteen laatua valmistusteknisistä näkökulmista esimerkiksi koneistusratoja tarkastamalla.

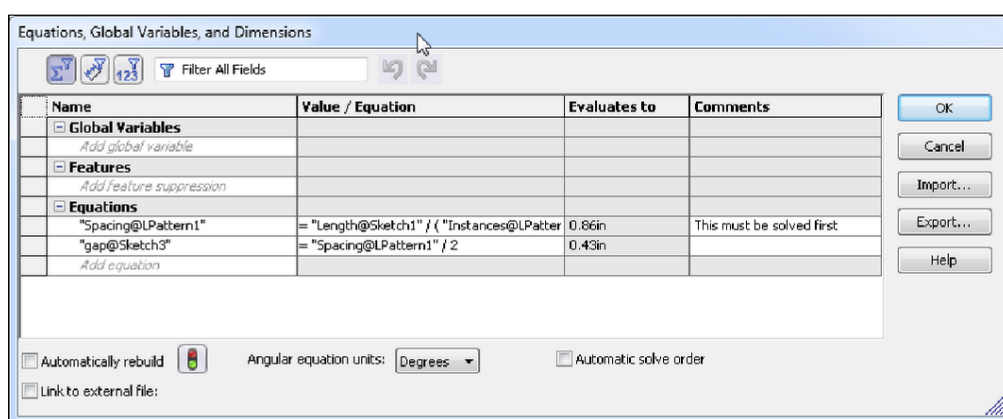
3 Tutkimusmenetelmät

Tämän luvun alussa käsitellään SolidWorksin ominaisuuksia CAD-ohjelmistona suunnitteluautomaation näkökulmasta. Seuraavassa osassa esitellään työn ohessa tehdyn tutkimuksen tuloksia kaupallisista ohjelmistovaihtoehdoista CAD-integroidun suunnittelu-automaaatin toteuttamiseen SolidWorksin kanssa. Luvun lopussa vertaillaan löydettyjä vaihtoehtoja MFC:n vaatimusten näkökulmasta ja valitaan MFC:lle sopivimmaksi arvioitu vaihtoehto tutkittujen ohjelmistojen joukosta.

3.1 SolidWorks suunnittelu ympäristönä

SolidWorks on Dassault Systèmesin kehittämä kaupallinen CAD-ohjelmisto, jonka käyttö perustuu 3D-mallien rakentamiseen. 3D-mallit koostuvat erilaisista SolidWorksin piirteistä, jotka luodaan piirtämällä yksinkertaisia kaksiulotteisia äärirajapiirustuksia ja valitsemalla haluttu toiminto SolidWorksin piirrevaihtoehtoista (Lombard 2013, s. 3). 3D-malleista voidaan luoda 2D-piirustuksia ja 3D-kokoonpanoja, jotka perinteisessä mallinnuksessa koostuvat yksittäisistä 3D-malleista ja niiden välisistä riippuvuussuhteista (Mathew ja Rao 2010). Tässä luvussa ei kuitenkaan perehdytä tarkemmin SolidWorksin peruskäyttöön, vaan tarkastellaan SolidWorksistä löytyviä suunnitteluautomaation kannalta hyödyllisiä erityisominaisuuksia.

SolidWorksiin on luotu jonkin verran valmiita KBE-metodeja, kuten putkenmallinnus-toiminto ja levytyökalu, jolla voidaan tehdä taitoksia levymetallikomponentteihin. Levytyökalun ansiosta käyttäjä pystyy syöttämään alkuarvot, kuten taittosäteen ja -kulman ohjelmalle, jonka jälkeen ohjelma laskee lopputuloksen ja palauttaa käyttäjälle muokatun 3D-mallin (Lombard 2013, s. 1015-1017). Näin ollen osan valmistuspiirustusta luodessa levykomponentista saadaan samaan piirustukseen lisättyä kuvantoja sekä taitetusta että taittamattomasta mallista. Yksittäisten komponenttien osalta SolidWorksistä löytyy myös kattavat mahdollisuudet parametriseen mallinnukseen relaatioita hyödyntämällä. Mitoille voidaan luoda keskinäisiä riippuvuussuhteita tai asettaa ne riippuvaiseksi halutusta laskentakaavasta. Näin luotuja riippuvuussuhteita ja laskentaa voidaan ohjata Equations-työkalulla (Kuva 12) (Lombard 2013, s. 358).



Kuva 12 SolidWorksin työkalu mittojen välisten relaatioiden ja laskennan ohjaamiseen (Lombard 2013, s. 358)

Monimutkaisissa komponenteissa, joissa laskentaa ja relaatioita kertyy merkittävän paljon, relaatioiden hallinta voi käydä haastavaksi, jolloin mallista tulee nopeasti vaikeasti ylläpidettävä ja ohjattava. Helpotuksena ongelmaan SolidWorksiin on luotu Design table -

ominaisuus, jonka avulla malli voidaan linkittää Excel-taulukkoon. Yksittäiset Excel-taulukon solut linkitetään 3D-mallin päämittoihin, jolloin mallin geometriaa voidaan ohjata kirjoittamalla halutut syöttöarvot soluihin (Prince et al. 2005). Design table -toiminnon avulla myös laskenta voidaan siirtää Excel-taulukon puolelle, jolloin 3D-mallin generointia saadaan nopeutettua. Silti monimutkaisissa konstruktioissa ominaisuuden käyttö muodostuu turhan raskaaksi, minkä ratkaisemiseksi SolidWorksiin on rakennettu tuki omalle ohjelmointirajapinnalle.

SolidWorksin tukema ohjelmointirajapinta eli API *engl. Application Programming Interface* on käyttöliittymä, joka antaa käyttäjälle mahdollisuuden ohjelmoida uusia lisäohjelmia toimintojen yksinkertaistamiseksi tai automatisoinniksi. SolidWorks API:lla voidaan esimerkiksi luoda ohjelma, joka mallintaa tietyn kokonaisuuden automaattisesti pohjaksi manuaaliselle työlle, suorittaa tarkastuksia ja analyyskejä mallinnuksen eri vaiheissa tai määrittää kuinka dataa halutaan jakaa muiden API:a tukevien ohjelmien kanssa (Prince et al. 2005). SolidWorks API käyttää Visual Basic -ohjelmointikieltä (Lad ja Rao 2014), joka perustuu BASIC-kieleen *engl. Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code* (Prince et al. 2005). Tämän työn tavoitteena ei ole tarkemmin perehtyä ohjelmointitekniisiin ongelmiin mutta mainittakoon silti, että esimerkiksi automatisoidun mallinnusprosessin luomiseen riittää kyky tulkita ja ymmärtää Visual Basic -kieltä, joka on nimensä mukaisesti verrattain helppolukuinen kieli. Mallinnus voidaan toteuttaa tallentamalla itse tehty työ omaksi makrokseen. Makrolla tarkoitetaan SolidWorksin toimintosarjaa, joka toteutetaan yhtä nappia painamalla. Tämän jälkeen makro avataan ohjelmointirajapinnassa ja poistetaan koodista ylimääräiset toiminnot. Näin ollen kaikki kertaalleen manuaalisesti tehdyt vaiheet saadaan toistettua SolidWorksissä nopeutettuna ja automatisoidusti ilman ylimääräisiä klikkauksia tai mallin kuvakulmamuuksia. Lisäksi API:lla voidaan luoda yksinkertaisia käyttöliittymiä 3D-mallin tai -kokoonpanon ohjaamiseen. Käyttöliittymässä käyttäjältä pyydetään syöttöarvoja, joiden mukaan mallia tai kokoonpanoa konfiguroidaan. Valinnat voivat vaikuttaa esimerkiksi mallien mitoittamiseen ja geometriaan, käytettävien mallikonfiguraatioiden valintaan tai kokoonpanoon lisättäviin osiin SolidWorksin mallikirjastosta.

SolidWorksillä luotuihin 3D-malleihin on mahdollista lisätä konfiguraatiovaihtoehtoja. Mallin konfiguraatioihin voidaan tallentaa versioita 3D-mallista, jossa tiettyjä piirteitä on joko piilotettu tai lisätty näkyviin. Siten pystytään API:lla luodusta käyttöliittymästä valitsemaan halutaanko kokoonpanoon lisätä esimerkiksi 3D-mallin aihio vai koneistettu versio. Kokoonpanojen luonnin nopeuttamiseksi SolidWorks tarjoaa myös mahdollisuuden mallikirjastojen luontiin. MFC:llä ominaisuutta hyödynnetään standardiosien kanssa siten, että kirjastoon on luotu parametriset mallit esimerkiksi ruuveille ja muttereille. Osat muokkautuvat parametrisesti käyttäjän tekemien kokovalintojen mukaan ja siten kokoonpanoon saadaan kiinnitystä vaille valmiit osat.

3D-kokoonpanojen automatisoidussa rakentamisessa on tärkeää, että osat saadaan kiinnitettyä oikeille paikoilleen. Toisaalta osien tulee olla myös vaihdettavissa tai poistettavissa kokoonpanosta ilman, että muiden osien väliset linkitykset rikkoutuvat. SolidWorksissä tämä voidaan varmistaa top-down-suunnittelulla, jossa kokoonpanotasolle lisätään esimerkiksi piirustuksia, akseleita ja tasoja, joihin kokoonpanoon lisättävät osat sidotaan. Täten yksittäisiä 3D-malleja ei tarvitse linkittää kiinni toisiinsa ja kokoonpano säilyy ylläpidettävänä.

SolidWorksistä löytyy merkittävä määrä ominaisuuksia suunnitteluautomaation kehittämiseen yksittäisten osien ja kokoonpanojen geometriseen muokkaamisen osalta. SolidWorksin työkaluilla on kuitenkin haastavaa luoda helposti ylläpidettävää tuotemallia, johon pystyttäisiin sisällyttämään suuria määriä tuotteen suunnittelusäännöstöä ja logiikkaa. Lisäksi ohjelman sisältämät valmiit mahdollisuudet piirustusautomaatioon ovat rajalliset. MFC:llä piirustusten osalta on automatisoitu otsikkokenttien täyttäminen ja osa suunnittelijoista käyttää hyödyksi mahdollisuutta hakea 3D-malleihin luodut mitat suoraan piirustuksen kuvantoihin. Kuitenkin esimerkiksi mittojen sijoittelun ennustaminen on haastavaa. Ohjelman automaatioon liittyviin puutteisiin on luotu suuri määrä erilaisia suunnitteluautomaatio-ohjelmia, joista SolidWorksin omilta internet-sivuilta löytyy yhteistyökumppaniyritysten kautta esimerkiksi Tacton Design Automation, DriveWorks sekä AutomateWorks (SolidWorks 2017). Kaupallisia ohjelmistovaihtoehtoja tutkitaan työn seuraavassa luvussa.

3.2 Tutkimus ohjelmistovaihtoehtoista

Tässä kappaleessa esitellään tutkitut suunnitteluautomaatio-ohjelmistot sekä ohjelmistojen kehittäjä- ja tarjoajayritykset, sillä MFC:lla pidetään tärkeänä, että myös sen yhteistyökumppanit sekä käytettävät ohjelmistot ovat menestyksekkäitä omalla alallaan. Tutkimuksessa huomioitujen kaupallisten suunnitteluautomaatio-ohjelmistojen rajoitteena oli, että niissä täytyy olla mahdollisuus CAD-ohjelmistosta irrallisten suunnittelusääntöjen luontiin ja niiden tulee toimia tehokkaasti yhdessä SolidWorks-ohjelmiston kanssa. Lisäksi tutkimuksen loppuvaiheessa rajattiin ulkopuolelle sellaiset ohjelmistot, joihin ei ole saatavilla myynti- ja tukipalveluita Suomesta. Näin ollen päädyttiin kolmeen potentiaalisimpaan ohjelmistovaihtoehtoon, joihin tässä luvussa perehdytään tarkemmin. Tuotetiedonhallinnan osalta oletettiin, että MFC:lla työntekehokellä käytössä oleva PDM-järjestelmä ATON tullaan päivittämään lähitulevaisuudessa, joten integraatiomahdollisuutta ATON-ohjelman kanssa ei vaadittu. Ohjelmistotutkimus perustuu alan kirjallisuudesta löydettyihin referensseihin sekä ohjelmistonkehittäjäyritysten kanssa sovittuihin esittelytilaisuuksiin.

3.2.1 Tacton Design Automation, Tacton Systems

Tacton Systems on maailman johtava kehittyneiden myynti- ja tuotekonfiguraattoreiden valmistaja (Tacton 2016). Yritys perustettiin Ruotsissa vuonna 1998 lähes 10 vuotta kestäneen KBE-menetelmien ja konfiguraattorien tutkimus- ja kehitystyön seurauksena (Tacton 2016). Nykyään Tacton työllistää yli 200 henkilöä ympäri maailmaa (Tacton 2016) ja sen asiakkaita ovat muiden muassa Metso, ABB, Siemens ja Wärtsilä (Järviö 2016). MFC omistaa useita lisenssejä Tactonin CPQ-työkaluun *engl. Configure Price Quote*, jonka käyttöönotto on meneillään diplomityön valmistumisvaiheessa. CPQ-työkalua halutaan MFC:lla hyödyntää erityisesti myynnin tehtävissä, joten siihen ei perehdytä tämän työn puitteissa tarkemmin muilta kuin niiltä osin, jotka vaikuttavat myös suunnitteluautomaatin käyttöön.

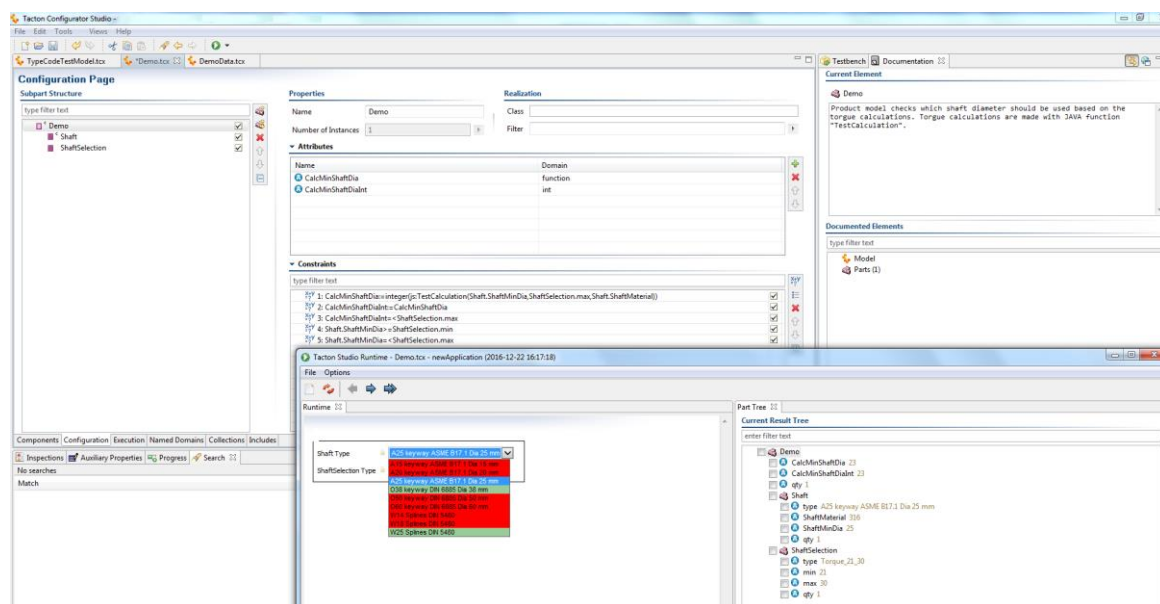
Tacton Design Automation on ohjelmisto parametrisoidun emomallin konfigurointiin ja muokkaamiseen sekä valmistusdokumenttien automaattiseen tuottamiseen säännösten mukaisesti (Järviö 2016). Ohjelma on vahvasti CAD-integroitu ja siitä on olemassa versiot SolidWorks ja Inventor CAD-järjestelmiä varten (Keijser ja Lindström 2016). MFC:n käyttämä CAD-järjestelmä on SolidWorks, joten tässä työssä keskitytään vain sen kanssa integroitaviin ohjelmiston osiin. Tacton Design Automationin toiminta perustuu älykkäästi parametrisoidun emomallin ja tuotemallin luomiseen sekä niiden keskenäiseen linkittämiseen. Tuotemalleihin sisällytetään KBE-menetelmien mukaisesti kyseisen tuotteen

suunnittelusäännöt, rajoitteet, standardit, laskenta ynnä muut tuotteen muokattavuutta rajoittavat ja ohjaavat tekijät (Keijser ja Lindström 2016). Tuotemallin säännöstö voidaan linkittää parametrisoidun emomallin komponentteihin, mittoihin tai piirteisiin ja siten pystytään luomaan automaattisesti tuotemallin konfiguraatiovalintojen mukainen 3D-kokoonpano, joka sisältää kaikki siihen kuuluvat osat sekä luomaan tarvittavat kokoonpano- ja valmistuspiirustukset (Järviö 2016). Osaamista Tactonin tuotemallien luomisesta löytyy MFC:lta valmiiksi, sillä niitä on jo luotu yrityksessä merkittävä määrä CPQ-työkalua varten. Tacton Design Automation käyttää tietokantanaan samoja tuotemalleja kuin CPQ-työkalukin (Keijser ja Lindström 2016). Tämä on syytä ottaa erityisesti huomioon suunnitteluautomaatio-ohjelmiston valinnassa, sillä saman ohjelmiston käytössä niin myynnin tilaussuunnitteluun kuin CAD-integroituun suunnitteluautomaatioon on ilmeisiä hyötyjä, kun ei ole tarvetta ylläpitää ja käyttää useita järjestelmiä samanaikaisesti (Felfernig 2014, luku 17 s. 213). Tacton itse kutsuu tuotemallejaan Tacton-konfiguraatiomalleiksi (Keijser ja Lindström 2016).

Tuotemallien luominen voidaan toteuttaa Tactonissa joko itsenäisellä Tacton Configurator Studio -ohjelmalla (jatkossa TC Studio) tai Tacton Design Automation Studio -työkalulla (jatkossa TDA Studio), joka toimii CAD-ohjelmistoon sulautettuna (Keijser ja Lindström 2016). Molemmilla pystytään sisällyttämään tuotemalliin tarvittava säännöstö ja linkitykset emomallina toimivaan 3D-kokoonpanoon. Tactonin tuotemallien tiedostotyyppi on TCX-tiedosto, joka koostuu XML-koodista engl. *eXtensible Markup Language* (Keijser ja Lindström 2016). XML-ohjelmointikielestä on tullut hallitseva kieli tiedon esittämiseen ja vaihtoon internetissä (Qtaish ja Ahmad 2015). Internetin lisäksi XML-kieltä käytetään usein yrityksissä tiedon varastointiin ja hakuun. Tiedon varastointia varten XML-kielessä on eräs hyödyllinen ominaisuus, mikä on mahdollisuus luoda tiedosto hierarkiseksi tietomalliksi (Qtaish ja Ahmad 2015). Tätä ominaisuutta hyödynnetään myös Tactonissa tuotemallin rakentamiseen. Siten TC Studio ja TDA Studio ovat pohjimmiltaan graafisia käyttöliittymiä XML-koodin muokkaamiseen ja tallentamiseen (Keijser ja Lindström 2016). Molemmissa käyttöjärjestelmissä on omat hyötynsä erilaisia toimenpiteitä tehdessä. Tacton-ohjelmistoa ei ole kuitenkaan suunniteltu siten, että suora XML-koodin muokkaaminen olisi järkevää (Keijser ja Lindström 2016). Järjestelmä ei tee koodista selkokielistä dokumentaatiota ja siten tiedoston tulkinta suoraan koodista veisi kohtuuttomasti aikaa.

TC Studio on Tactonin tuotemallien luomista ja muokkamista varten luotu itsenäinen ohjelma, jonka käyttöliittymä näkyy Kuvassa 13. Kuvan tuotemalli on luotu MFC:lta valmiina löytyvällä TC Studio -lisenssillä esimerkkinä tätä työtä varten. Tuotemalli laskee sopivimman akselin halkaisijan vääntömomentin perusteella ja siten pystyy poissulkemaan annetuille alkuarvoille sopimattomat vaihtoehdot. Vääntömomentin laskenta suoritetaan tuotemalliin liitettyllä JAVA-funktiolla ”TestCalculation”. Kuvan 13 vasemmassa laidassa näkyy tuotemallin ”Demo” rakennepuu, josta löytyvät osat ”Shaft” ja ”ShaftSelection”. Keskellä ylhäällä näkyy Attributes-taulukko, jonne syötetään ne attribuuttiarvot, joilla tuotemallin muunneltavuutta halutaan ohjata. Demo-tuotemallissa attribuutteina ovat ”CalcMinShaftDia” ja ”CalcMinShaftDiaInt”, jotka voidaan haluttaessa yhdistää CAD-järjestelmässä luotuun 3D-emomalliin. Attribuuttien alla on listattuna Constraints-taulukkoon ne suunnittelusääntöjen mukaiset rajoitteet, jotka määräävät attribuuttien arvon. Demo-tuotemallin tapauksessa ”CalcMinShaftDia” on funktio-attribuutti, joka kutsuu TestCalculation-funktiota. Funktio palauttaa käyttäjän antamien alkuarvojen perusteella sopivimman akselin halkaisijan, joka tallennetaan kokonaislukuna millimetreinä CalcMinShaftDiaInt-attribuuttiin. Lopuksi rajoitteissa varmistetaan, että suositeltu akselin

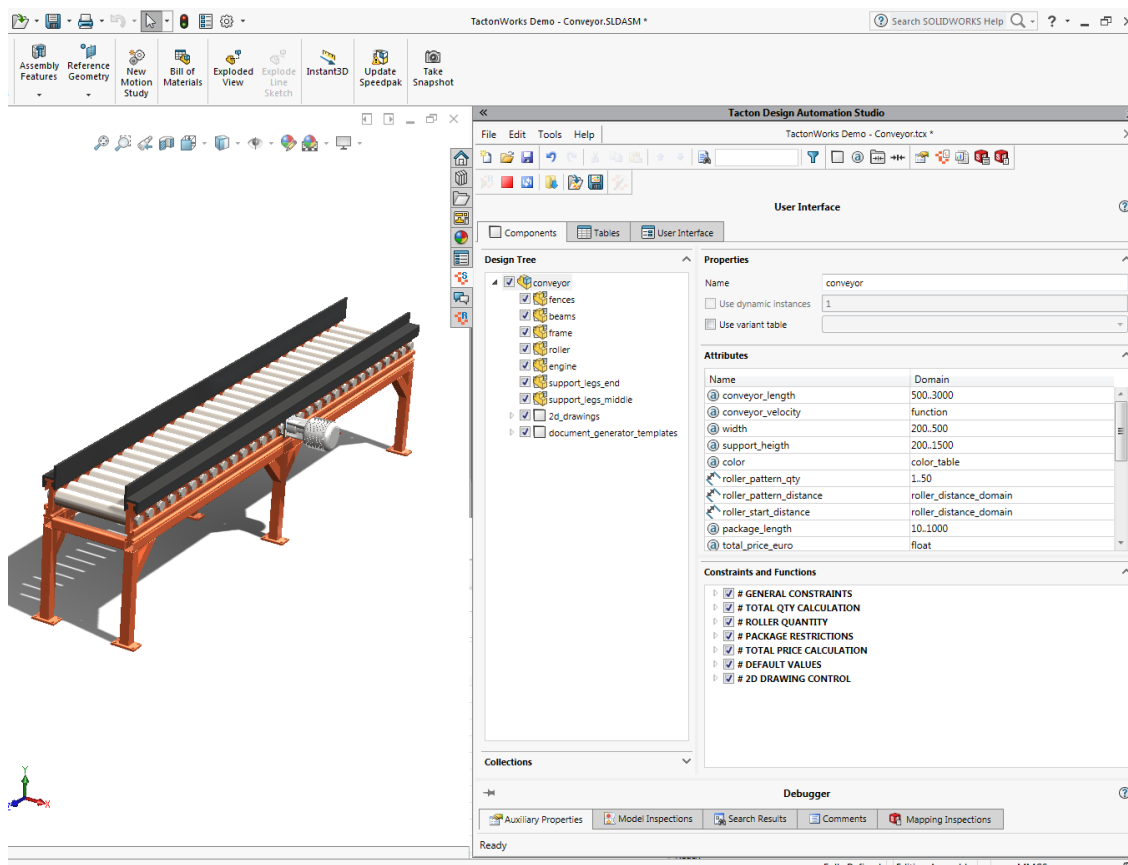
halkaisija toteuttaa muut vaadittavat säännöt. Kuvan 13 oikeassa ylälaidassa näkyvään Description-kenttään on Demo-tuotemallissa lisätty lyhyt kuvaus siitä, mitä varten kyseinen tuotemalli on luotu ja mikä sen tärkein tehtävä on.



Kuva 13 Tacton Configurator Studio

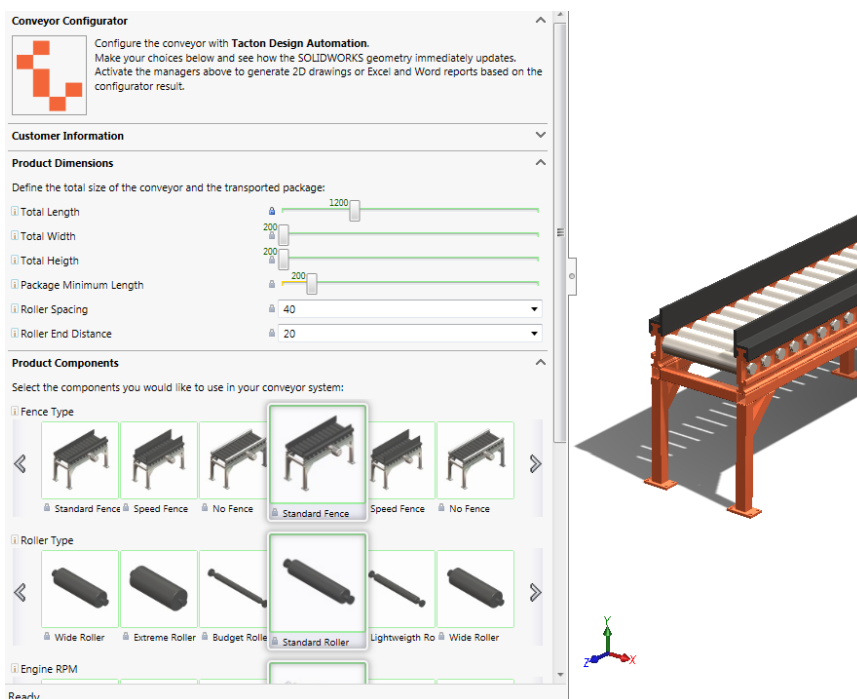
Tactonin tuotemalli koostuu useista välilehdistä. Jos tuotemallin suunnittelusäännöstöön kuuluu excel-taulukoita, ohjelman ulkopuolisia skriptejä, kuten Demo-tuotemallissa tai muita data-tiedostoja, ne voidaan lisätä Includes-välilehdellä tuotemalliin. Tacton tuotemallin ajo ja konfigurointi suoritetaan erillisessä Tacton Studio Runtime -ikkunassa, joka näkyy Kuvan 13 oikeassa alalaidassa. Konfiguraattori näyttää vihreällä alaspäinvalikossa käyttäjän alkuarvoihin soveltuvat suunnittelusääntöjen mukaiset akselivaihtoehdot ja punaisella ne, jotka eivät sovellu käyttökohteeseen.

TC Studion käytöstä voi tulla haastavaa, kun säännöstö tulee linkittää emomallin mittoihin, piirteisiin tai komponentteihin. Tällöin on hyödyllistä käyttää TDA Studiota, joka toimii täysin sulautettuna SolidWorksiin (Keijser ja Lindström 2016). Kaikki TC Studiolla luodut tuotemallit pystytään avaamaan myös TDA Studiassa (Keijser ja Lindström 2016). Emomalli voidaan pitää jatkuvasti esillä ja tarkastaa esimerkiksi emomallin piirteen tai mitan nimi ohjelmaa vaihtamatta. Kuvassa 14 on kuvakaappaus Tacton Design Automation rullakuljetin-demosta. Kuvan oikeassa reunassa on nähtävissä SolidWorksiin sulautettu TDA Studio. Käyttöjärjestelmän vasemmassa laidassa nähdään tuotemallin hierarkinen puumalli ja oikealla luotuja attribuutteja, jotka on rajoitettu suunnittelusääntöjen mukaisesti. Mittojen linkitys voidaan toteuttaa TDA Studiolla valitsemalla haluttu mitta tai piirre 3D-mallista ja lisäämällä se attribuutiksi tuotemalliin. Kyseisen attribuutin arvo voidaan TDA Studiassa yhdistää esimerkiksi laskentafunktion palautusarvoon, määritettyyn vaihteluväliin tai taulukkoarvoon (Keijser ja Lindström 2016).



Kuva 14 Tacton Design Automation Studio -lisäohjelma SolidWorksiin (Järviö 2016)

Kuvan 14 vasemmassa laidassa näkyvä 3D-kokoonpano on emomalli rullakuljettimesta. Emomallin ohjaaminen ja konfigurointi tapahtuu graafisella CAD-järjestelmään sulautetulla Tacton Design Automation -tuotekonfiguraattorin käyttöliittymällä (Kuva 15). Käyttöliittymän tarkoituksena on yksinkertaistaa ja ohjeistaa käyttäjän haluamien alkuarvojen syöttöä ja tuotteeseen liittyvien valintojen tekemistä. Valintoja käyttöliittymässä voidaan tehdä esimerkiksi liukusäätimen, alasvetovalikon, kuvavalintojen tai tyhjen syöttöarvolokeroiden avulla (Kuva 15). Järjestelmä päivittää emomallin käyttäjän antamien lähtöarvojen mukaiseksi automaattisesti. Jos aiemmat rajoitteet rajaavat tuotemallista tiettyjä konfiguraatioita pois, niihin liittyvät vaihtoehdot poistetaan tulevista valinnoista. Kaikki toiminnot, joita käyttäjä voi CAD-järjestelmässä tehdä manuaalisesti, voidaan sisällyttää konfiguraattoriin, jolloin ne päivittyvät tarvittaessa emomalliin automaattisesti (Järviö 2016).



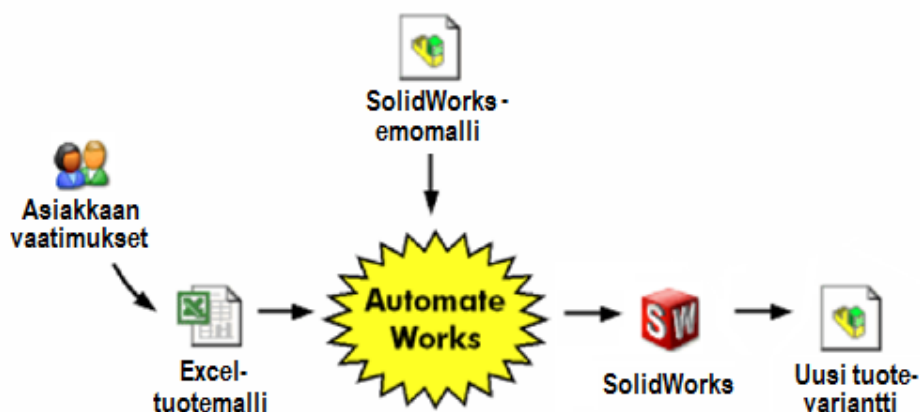
Kuva 15 Tacton Design Automation -tuotekonfiguraattorin käyttöliittymä (Järviö 2016)

Kun mallikonfigurointi on saatu suoritettua halutulla tavalla, tuotteesta voidaan luoda automaattisesti kokoonpanopiirustus tai yksittäisen komponentin valmistuspiirustus. Tacton Design Automation pystyy valitsemaan automaattisesti sopivan piirustus pohjan, asettelemaan ja skaalaamaan kuvannot, tekemään leikattuja tai lähennettyjä kuvantoja, lisäämään ja asettelemaan halutut mitat oikeille paikoilleen sekä luomaan halutut merkinnät mukaan lukien toleranssi- ja pinnankarheusmerkinnät (Keijser ja Lindström 2016). Ohjelmiston piirustusautomaatiolla voidaan toteuttaa lähes kaikki ne toiminnot, jotka suunnittelija tekee perinteisesti käsin. Piirustusautomaatiota luodessa on kuitenkin huomioitava, että 100% valmiiden piirustusten tuottamisen automatisointiin voi kulua kohtuuttoman paljon aikaa (Keijser ja Lindström 2016). Tacton Design Automationin jälleenmyyjä Suomessa on PLM Group ja heidän mukaan ohjelmistolla tuotettujen piirustusten vienti ja versionti PDM-järjestelmään onnistuu järjestelmästä riippumatta, vaikka ohjelmisto ei valmista integraatiota PDM-järjestelmään sisälläkään (Järviö 2016). PLM Group on Pohjois-Euroopan suurin Dassault- ja SolidWorks-tuotteiden yhteistyökumppani ja siten he toimittavat myös MFC:n SolidWorks-lisenssit (Järviö 2016). Jos MFC:lla luotaisiin suunnitteluautomaatti Tacton Design Automationilla, PLM Group olisi todennäköinen yhteistyökumppani avustamaan automaatin luonti- ja käyttöönotto-vaiheessa aikaisemman yhteistyön perusteella.

3.2.2 AutomateWorks, CadWorks

CadWorks Oy on vuonna 1996 perustettu suomalainen ohjelmistoalan yritys (Simpanen ja Laaksonen 2016), joka tarjoaa asiakkailleen 3D-suunnittelun tuotteita ja palveluja. Yrityksellä on Suomessa yli 1000 asiakasyritystä ja sen liikevaihto oli vuonna 2016 noin 5 miljoonaa euroa (Simpanen ja Laaksonen 2016). CadWorksin näkemys on, että automaattityökalujen käytöllä voidaan vähentää rutiininomaisia työvaiheita eri vaiheissa suunnitteluprosessia. Näin ollen CadWorks on kehittänyt AutomateWorks-ohjelman, jolla pystytään automatisoimaan 3D-mallien ja piirustusten tuotantoa. AutomateWorks on

käytössä yli 100 asiakasyrityksessä, joihin kuuluvat muun muassa Valmet, Hamilton Marine, Lumon, Peikko Group ja Ferroplan (CadWorks 2016). Asiakasyrityksiin kuuluu myös insinööritoimisto ENTOP, joka on CadWorksin yhteistyökumppani AutomateWorks-pohjaisten suunnitteluautomaattien toteuttamisessa asiakkaille (Määttänen & Kuusi 2016). Täten valtaosa diplomityön aikana käydyistä keskusteluista AutomateWorksin toiminnan osalta käytiin ENTOPin edustajien kanssa. MFC:lla on aikaisempaa kokemusta AutomateWorksin käytöstä, sillä sitä osaltaan hyödynnettiin XH-venttiilisarjan suunnittelun yhteydessä. Käyttökokeilun tuloksia käydään tarkemmin läpi myöhemmin tässä luvussa. Tällä hetkellä uusin versio ohjelmistosta on AutomateWorks 4 (Simpanen ja Laaksonen 2016).



Kuva 16 AutomateWorksin toiminta (Simpanen ja Laaksonen 2016, mukaillen)

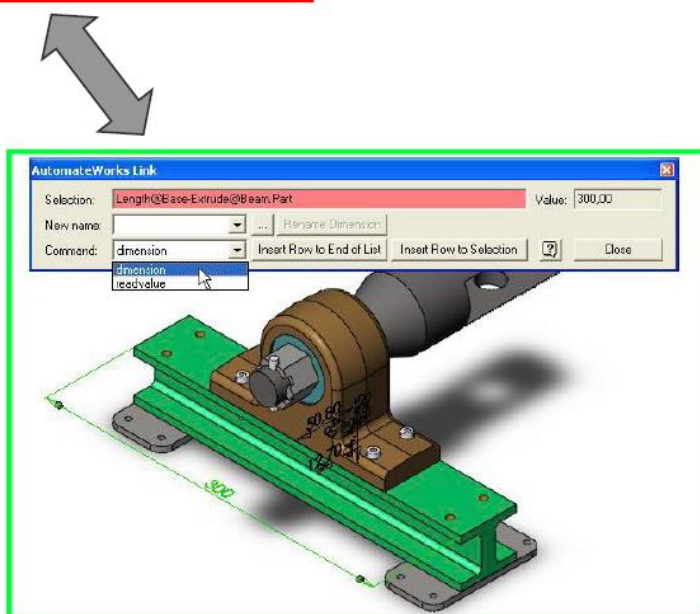
AutomateWorks on itsenäinen automaattiosovellus, joka toimii linkkinä SolidWorksin ja Microsoftin Excel-tilukkolaskentaohjelman välillä (Kuva 16) (Simpanen ja Laaksonen 2016). AutomateWorksillä pystytään rakentamaan tuotekonfiguraattori tuoterakenteen ja 3D-mallin sekä piirustusten automaattiseen muokkaamiseen. Automaatin tuotemalli luodaan Excel-tilukkuun, jolloin pystytään hyödyntämään Excel-ohjelman valmiita laskentominaisuuksia (Simpanen ja Laaksonen 2016). Tuotemalliin luodaan konfiguraattorin käyttöliittymä, johon syötetään asiakkaan vaatimusten mukaiset arvot konfigurointia varten (Kuva 16). Excel toimii myös järjestelmän laskentamoottorina, joten AutomateWorksin toiminta on siitä riippuvainen, eikä ohjelmistoa voida käyttää ilman sitä. (Simpanen ja Laaksonen 2016.) Tuotemalli koostuu rivipohjaisesta Excel-komentojonosta, joka luodaan graafisella käyttöliittymällä SolidWorksin sisällä. AutomateWorks sisältää integroidut lisäosat sekä Exceliin, että SolidWorksiin, mikä nopeuttaa tuotemallin luomista (Simpanen ja Laaksonen 2016). Lisäosien avulla attribuuttidatan siirto ohjelmien välillä onnistuu yhdellä toimenpiteellä (CadWorks 2016). Tätä ohjelmiston ominaisuutta käytettiin hyväksi MFC:lla Tiger-projektissa, jossa suunniteltiin automaatin avulla paineluokkien ASME 900 ja ASME 1500 XH-venttiilisarjat (Kelho 2016). CAD-ohjelmiston puolella ohjelman toiminta perustuu älykkäästi parametrisoidun emomallin muokkaamiseen ja konfigurointiin. Automaattia käytetään usein suurten SolidWorks-kokoonpanojen ohjaamiseen, mutta järjestelmää voidaan käyttää myös työkaluna uusien osien tuottamisessa. AutomateWorks pystyy muun muassa seuraaviin toimintoihin (CadWorks 2016):

- muokattavan mallin avaaminen, sulkeminen ja tallentaminen uudella nimellä
- mittamuutokset osissa ja kiinnityksissä
- komponenttien näkyvyyden hallinta

- komponenttien sisäisten versioiden eli konfiguraatioiden vaihtaminen
- komponenttien korvaaminen toisella
- piirustuksessa ja osaluettelossa näytettävien attribuuttitietojen muutokset
- SolidWorks-makrojen tai käyttöjärjestelmäkomentojen suorittaminen
- 3D-mallien ja piirustusten tallennus lukuisiin eri muotoihin esim. PDF, DWG tai STEP.

Toiminnallisuutensa osalta ohjelmistoa voidaan kutsua mallikonfiguraattoriksi. Käytännössä mallikonfiguraattori luodaan seuraavalla tavalla. Valitsemalla SolidWorksissa luodun emomallin piirteitä saadaan näkyville muokattavat mitat tai ominaisuudet. AutomateWorksin lisäohjelmalla voidaan luoda Kuvan 17 mukaisesti SolidWorksissä uusia komentoja suoraan Excel-pohjaiseen tuotemalliin, joka on käytännössä riviperusteinen komentojono, jossa yksi rivi sisältää yhden komennon. Ohjattava parametri poimitaan emomallista ja sille valitaan haluttu komento. Jokaiselle parametrille määritetään tuotemalliin oletusarvo.

Command	SolidWorks Object	Value
open	C:\AutomateWorks tutorial\AutomateWorks Tutorial.SLDASM	
dimension	Length@Base-Extrude@Beam.Part	300
configuration	Shaft-1@AutomateWorks Tutorial	cut 20
suppresscomp	Foot-1@AutomateWorks Tutorial	FALSE
suppresscomp	Foot-2@AutomateWorks Tutorial	FALSE
suppressfeature	Frame Holes@Beam-1@AutomateWorks Tutorial	FALSE



Kuva 17 Komentojen lisääminen tuotemalliin AutomateWorksillä (Simpanen ja Laaksonen 2016)

Tämän jälkeen toiselle Excel-välilehdelle luodaan konfiguraattoria varten käyttöliittymä, johon asetettavat syöttöarvot linkitetään komentojonon komentoihin. Asiakkaan vaatimusten mukaisten syöttöarvojen avulla konfiguraattorin käyttäjä voi ohjata mallia Excel-käyttöliittymästä käsin. Konfigurointi voidaan suorittaa myös AutomateWorksin omalla graafisella käyttöliittymällä, joka muistuttaa hyvin paljon yleisimpiä Microsoftin käyttöliittymiä nopeuttaen ohjelmiston käytön omaksumista. Käyttöliittymät räätälöidään jokaiselle tuotteelle erikseen siten, että siinä saadaan syötettyä kaikki suunnitteluun vaikuttavat lähtötiedot.

Konfiguroinnissa muutokset siirtyvät yhdellä toimenpiteellä SolidWorks-malliin, jolloin kaikki kokoonpanon 3D-mallit, piirustukset, osaluettelot ja muut tuotettavat dokumentit

päivittyvät automaattisesti asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Dokumenttien tuottamisen jälkeen ne voidaan siirtää yrityksen PDM-järjestelmään automaattisesti CadWorksin tarjoaman CustomWorks-ohjelman avulla. CustomWorksillä voidaan siirtää myös konfiguroituja tuoterakenteita suoraan ERP-järjestelmään. CustomWorks on suunniteltu käytettäväksi yhteistoiminnassa AutomateWorksin kanssa, jolloin koko suunnitteluprosessi alkuarvojen syöttämisestä tuotannon aloittamiseen voidaan automatisoida tuotteille, joiden konfiguroitava uusi tuotevariantti voidaan muodostaa olemassa olevista moduuleista tai tuotevariantin muunneltavuuden rajat on tarkasti tiedossa (CadWorks 2016).

Geneettinen suunnitteluautomaatti

MFC on kokeillut aiemmin tuotekehitysprojektin yhteydessä AutomateWorks ohjelmiston toimintaa, jossa venttiilin suunnittelusäännöistä luotiin Excel-pohjainen tuotemalli (Kelho 2016). Suunnitteluautomaatin toteutuksessa oli merkittävässä roolissa RD Velho Oy, joka on suomalainen tuotekehitykseen keskittynyt suunnittelutoimisto työllistäen tällä hetkellä 170 henkilöä (Kelho 2016, RD Velho 2016). Osana yrityksen toimintaa RD Velho tuottaa asiakkailleen suunnitteluautomaatteja. RD Velhon suunnitteluautomaatit ovat asiakkaiden tarpeiden mukaan räätälöityjä järjestelmiä. Yritys jakaa tarjoamansa suunnitteluautomaatit kolmeen kategoriaan, jotka ovat (Kelho 2016):

- parametrisoidut 3D-mallit
- konfiguraattorit
- sääntöpohjaiset suunnitteluautomaatit.

Suunnitteluautomaatteina parametrisoidut 3D-mallit ovat älykkäitä malleja, jotka on rakennettu parametrien perusteella mukautuviksi. Tällaisissa automaateissa hyödynnetään olemassa olevan 3D-mallinnusohjelmiston omia toimintoja ohjelmiston sisällä. RD Velhon konfiguraattorien toiminta perustuu esisuunniteltujen osien valintaan (Kelho 2016). Konfiguraattori ei ota kantaa yksittäisten osien geometrioihin, mutta kykenee tarkistamaan esimerkiksi liitospintojen yhteensopivuuksia. Esimerkiksi Koneella on käytössään RD Velhon rakentama hissikonfiguraattori (Kelho 2016).

Kolmas ja kaikista haastavin RD Velhon tarjoama suunnitteluautomaattityyppi on geneettinen eli sääntöpohjainen suunnitteluautomaatti. Sääntöpohjainen suunnitteluautomaatti toimii irrallaan CAD-ohjelmistosta. Se sisältää kaikki osien suunnitteluun vaadittavat laskentaperusteet ja optimoi itse parhaat ratkaisut kustannusten minimoimiseksi. MFC:lla toteutettiin RD Velhon avulla sääntöpohjainen suunnittelu-automaatti vuosina 2013 – 2015 tehdyn Tiger-projektin yhteydessä (Kelho 2016). Kyseisessä automaatissa käytettiin AutomateWorks-ohjelmaa linkkinä Excelillä luodun tuotemallin sekä SolidWorksin välillä (Kelho 2016).

Tiger-projektissa tavoitteena oli suunnitella kokonaan uusi palloventtiilisarja nimeltään XH. Sarja kehitettiin korkeisiin paineluokkiin ASME 900 ja ASME 1500, joten venttiilien tulee olla melko raskastekoisia. Suunnitteluautomaattia haluttiin käyttää 3D-mallien ja koneistuspiirustusten nopean luomisen lisäksi osien geometrioiden optimointiin siten, että materiaalia käytetään mahdollisimman vähän. Suurissa taosaihiosta koneistettavissa venttiileissä tuotteen hinta määräytyy pitkälti käytetyn materiaalin ja sen massan mukaan. Täten jokaisella taosaihiosta säästetyllä kilogrammalla voidaan vähentää tuotteen valmistuskuluja. Projektin suunnitteluautomaatti kehitettiin projektin sivutuotteena niillä

resursseilla ja ohjelmistoilla, mitä sillä hetkellä oli helpoiten saatavilla. Siten tuotemallin rakennusympäristöksi valittiin Microsoftin Excel-taulukkolaskentaohjelmisto. Projektin alkuvaiheessa suunnitteluautomaatin uskottiin tulevan yleiseen käyttöön MFC:n sisällä, joten automaatille rakennettiin perehtyneisyyttä vaativa, mutta omaksuttavissa oleva graafinen käyttöjärjestelmä (Kuva 18). (Kelho 2016.)

1. Pressure 2. Size 3. Class 4. Shaft 5. Flange								
Koko: 6"	2-axl (1500)	Jakotaso:	Kansi:Pyöreä	Packing:	Laskenta			
Paineluokka: 1500	X: 0mm	OD: 541mm	OD: 273mm	Akseli: 75mm	Jakotaso: OK			
Akselikoko: 75 mm	Kaulan etäisyys:	Laippa L: 108mm	Laippa L: 62mm	Jousipakka: Ø71, L=73	Kansi: HUOM!			
Design Pressure: 25,86207	Min (oletus)	Vaarna: 14x 1 7/8 - 8UN	Vaarna: 4x 1 7/8 - 8UN	Vaarna: 4x 1 1/4 - 8UN	Hälyn ohitus: EI			

PERUSTIEDOT	
Paineluokka: 1500	Maksimi lämpötila:
Venttiilin koko: 6"	
Design Pressure [Mpa]: Oletus 25,86	
Akselikoko: Oletus koko Ø75	
Rakennemitta: API 6D	Akseliversio: 2-axl (1500)

RUNKO, VAARNAT/MUTTERIT	
Putkilaipan standardi: ASME	Kierretyyppi jakotasssa: Tuumaistet
Putkilaipan koko: Venttiilikoko	Kierretyyppi kannessa: Tuumaistet
Runkomateriaali: F316	Kierretyyppi Packingissä: Metriset
Mutteri-/vaarnamateriaali: B8M c11	Vaarnan porrastus: 5

Työkalussa voimassa olevat poikkeamat:	
<input type="radio"/>	
<input type="radio"/>	
<input checked="" type="radio"/>	Kannen laskenta
<input type="radio"/>	
<input type="radio"/>	
<input checked="" type="radio"/>	Kaulan aseointi Bodyssa

Kuva 18 Tiger-projektissa käytetyn sääntöpohjaisen suunnitteluautomaatin käyttöjärjestelmä (Kelho 2016)

Resurssien rajoittuessa entisestään käyttöjärjestelmän kehittämisestä jouduttiin karsimaan ja lopullisessa versiossa sen käyttö olisi vaatinut pitkän perehdyttämisen kehitystyöstä ulkopuoliselle henkilölle. Täten projektin päätyttyä automaatti jäi käyttämättömäksi, eikä sitä jatkojalostettu muihin vastaaviin projekteihin, vaikka se olisi ollut verrattain pienellä työllä mahdollista. Kertakäyttöiselläkin automaatilla saavutetut hyödyt olivat kuitenkin merkittäviä. Perinteisin suunnittelumenetelmiin verrattuna venttiilien massa väheni huomattavasti. Yksittäisen venttiilikonseptin (Kuva 19) massaa pystyttiin pudottamaan alkuperäisestä manuaalisesti luodusta 1500 kg painavasta konseptista jopa 600 kg automaatin mahdollistaman iteratiivisen optimoinnin vuoksi, mikä mahdollisti venttiilin tuotantohinnan putoamisen merkittävästi alkuperäisestä (Kelho 2016).



Kuva 19 Suunnitteluautomaatilla suunniteltu valmis XH-venttiili (Kelho 2016)

Tehdyn suunnitteluautomaatin kattavamman käytön esteeksi muodostui resurssien puutteen vuoksi sen käyttöliittymä. Exceliä ei ole suunniteltu suunnitteluautomaatin tuotemallin

rakennusympäristöksi, joten sen toiminnallisuus siinä on osittain puutteellista. RD Velho onkin siirtynyt lokaaleista Excel-pohjaisista suunnitteluautomaateista yhä enemmän WEB-pohjaisiin automaatteihin, joissa automaatti ja sen tietokannat ovat pilvessä saatavilla ympäri maailman (Kelho 2016). Tällaista suositellaan myös MFC:n tarpeisiin globaalina yrityksenä. Lisäksi revisiohallinta oli tehdyssä automaatissa haasteellista ja aikaa vievää, sillä sitä ei päätetty automatisoida vaan jokainen PDM-järjestelmään viety piirustus tai malli, jouduttiin revisioimaan manuaalisesti (Kelho 2016).

3.2.3 Rulestream ETO, Siemens PLM Software

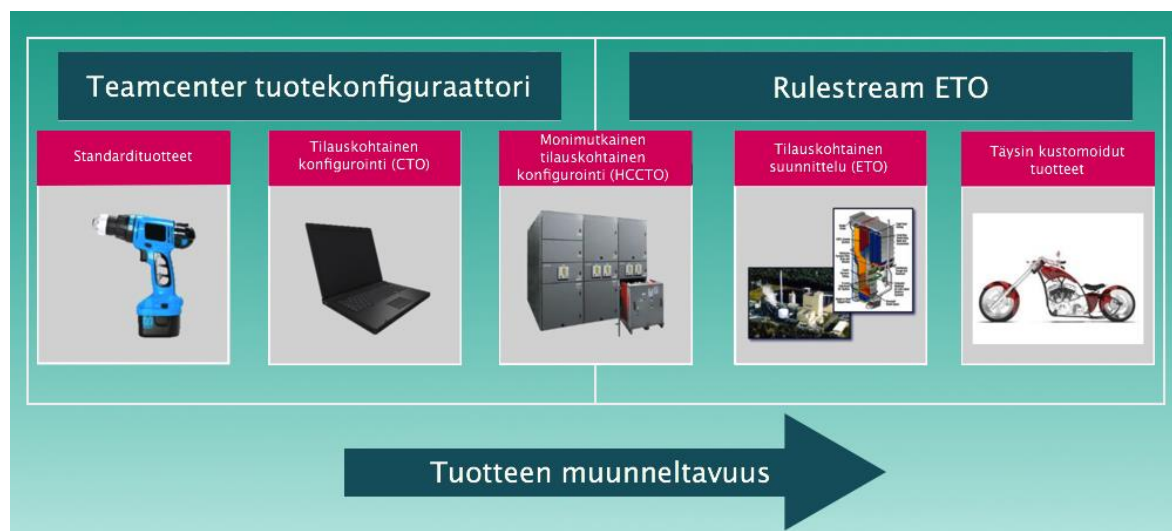
Rulestream ETO *engl. Engineering to Order* on Siemens PLM Softwarin *engl. Product Life Cycle Management* kehittämä KBE-järjestelmä suunnitteluautomaattien rakentamiseen (La Rocca 2012). Suomessa Rulestream-ohjelmistoa jälleenmyy Ideal PLM, joka on vuonna 1992 perustettu yritys. Ideal PLM tarjoaa ohjelmistoja kaikkiin tuotteen elinkaaren vaiheisiin esisuunnittelusta, suunnitteluun, simulointiin, valmistukseen, jälkimarkkinointiin ja romutukseen asti. Yritys työllistää yli 80 työntekijää, jotka pääosin tekevät ohjelmistojen käyttöönottoja erityyppisiin ja -kokoisiin asiakasyrityksiin. Ideal PLM:n asiakkaat ovat pääasiassa konepajayrityksiä, kuten Metso, ABB, Konecranes ja Wärtsilä, mutta asiakkaina on myös lääketeollisuuden, vaatealan ja elektroniikkateollisuuden yrityksiä. Yhteistyökumppanina Idealilla on Siemens, jonka ansiosta tarjontaan kuuluvat kaikki Siemens PLM Softwarin CAD-, CAM-, CAE-, PDM-, valmistussimulointi-, CTO- ja ETO-tuotteet. Näihin tuotteisiin kuuluvat Siemens Rulestream ja Teamcenter -ohjelmistot, joita tässä kappaleessa käsitellään tarkemmin. (Karvonen ja Renko 2016.)

Ideal PLM jakaa tuotteet varioituvuutensa perusteella viiteen eri luokkaan, jotka ovat (Kuva 20) (Karvonen ja Renko 2016):

- standardituotteet
- CTO (configured-to-order)
- HCCTO (high complexity configured-to-order)
- ETO (engineer-to-order)
- täysin kustomoidut tuotteet.

Standardituote on esimerkiksi rautakaupassa myytävä pora, johon ei ole saatavilla minkäänlaista variaatiota. Jos variaatioita on saatavilla, kuten eriväriset kuoret, kyseessä on eri tuote. Standardituotteet ovat yleensä suuren volyymin tuotteita. CTO-tuotteissa eli tilauskohtaisesti konfiguroiduissa tuotteissa, kaikki asiakkaan valinnat on tehty olemassa olevien mahdollisuuksien perusteella. Tällainen tuote on esimerkiksi auto, jonka asiakas voi tilata esimerkiksi internetsivuilta löytyvällä konfiguraattorilla. Konfiguraattorissa voidaan valita esimerkiksi auton moottori, väri ja vanteet, mutta kaikki nämä vaihtoehdot löytyvät toimittajalta ennalta valmiina konfiguraatioina. CTO-tuotteet ovat useimmiten massatuotteita, joita myydään paljon. HCCTO-tuotteissa, eli monimutkaisissa tilauskohtaisesti konfiguroitavissa tuotteissa, validioidaan suunnittelusääntöjä, tuotetaan uusia kombinaatioita ja nimikkeitä kokoonpanotasolla, suoritetaan optimointeja sekä lujuuslaskentaa ja niihin voidaan sisällyttää talon sisäisiä laskentaohjelmia. HCCTO-tuotteet ovat usein keskisuuren volyymin tuotteita, joissa on valtava määrä mahdollisia kombinaatioita. ETO-tuotteissa, eli tilauskohtaista suunnittelua vaativissa tuotteissa, on valmiiksi suunniteltuina ja mallinnettuina ainoastaan joitain komponentteja, jolloin automaatin täytyy luoda tilausten toteuttamista varten suunnittelusääntöjen ja laskennan pohjalta uusia 3D-malleja, valmistuspiirustuksia ja kokoonpanokuvia. Tuotteen suunnittelun

vaatima laskenta ja analyysi on laaja-alaista. ETO-tuotteiden automaattit sisältävät KBE-menetelmien avulla luodun tuotemallin suunnittelusääntöineen. Tuotteiden tuotanto on yleensä matalaa tai keskisuurta. Viides ja varioituvin tuoteluokka on täysin kustomoidut tuotteet. Täysin kustomoiduille tuotteille ei ole olemassa valmiina lainkaan suunnittelusääntöjä vaan ne luodaan tilauksen edetessä. Täysin kustomoiduissa tuotteissa lähes kaikki osat suunnitellaan alusta alkaen. (Karvonen ja Renko 2016.)



Kuva 20 Siemens PLM Softwaren automaatio-ohjelmistot Teamcenter ja Rulestream käyttökohteineen (Karvonen ja Renko 2016, mukaillen)

Siemens Teamcenter -ohjelmisto on CTO-tason PLM-ohjelmisto, joka sisältää muun muassa PDM-ohjelmiston toiminnot ja erilaisia myynti- ja suunnittelukonfiguraattoreita. Teamcenterin tuotekonfiguraattoria voidaan käyttää myös joiltain osin HCCTO-tason tuotteisiin. (Karvonen ja Renko 2016) Kyseiset konfiguraattorit eivät sisällä kuitenkaan CAD-integraatiota siinä määrin, että niillä voitaisiin luoda uusia 3D-malleja, joten ne jätetään tässä tarkastelussa syvällisemmin huomioimatta. Mainittakoon kuitenkin, että Teamcenter-lisenssejä on jo ostettuna Metso Oyj:n käyttöön ja se on globaalissa käytössä ainakin Metso Mineralsin puolella. Täten ohjelmistosta löytyy valmiiksi merkittävä määrä osaamista ja kokemusta.

Siemens Rulestream on ETO-tason suunnitteluautomaatio-ohjelmisto, jolla ensisijaisesti pyritään nopeuttamaan suunnitteluprosessia yrityksen perustuotteista räätälöitäville tuotteille. Tarve Rulestreamin käytölle Siemensin PLM -ohjelmistoista syntyy siinä vaiheessa, kun suunnitteluautomaatin halutaan luovan uusia 3D-malleja ja valmistuspiirustuksia, käyttää KBE-menetelmiä tai suorittaa esimerkiksi FEM- tai virtauslaskentaa. Rulestream-ohjelmiston kehittäminen aloitettiin 1990-luvun puolivälissä ja se julkaistiin vuonna 2001. (Karvonen ja Renko 2016.) Rulestreamin kehityksessä kantavina ajatusmalleina olivat seuraavat neljä seikkaa (Karvonen ja Renko 2016):

1. tuotteen suunnittelusäännöt ja tuotemalli voidaan kirjoittaa ilman ohjelmointitaitoa
2. kaikki suunnittelusäännöt kerätään kirjalliseen tietokantaan
3. pysyvä säännöstö kirjataan erilleen vaihtuvasta datasta
4. oma tehokas laskenta-alusta.

Konepajateollisuudessa henkilöt, joilla on tieto tuotteen suunnittelusäännöistä ja tuotemallista eivät usein omaa vahvaa ohjelmointitaitoa. Täten mahdollisuus kirjata ne tietokantaan ilman ohjelmointitaitoa mahdollistaa sen, että jokainen henkilö, jolta tuotteen suunnittelun kannalta oleellinen tieto löytyy, voi tehdä sen itse ilman välikäsiä. Kun kaikki suunnittelusäännöt, kuten yksittäiset arvot, kaavat ja laskennat on luotu kirjalliseen tietokantaan, niiden ylläpito on yksinkertaisempaa. Jos tietokantaa muokataan, Rulestream tallentaa tietokantaan tehdyt muutokset, muutoksen tekijän ja ajankohdan sekä alkuperäisen datan. Täten ylläpito on läpinäkyvää ja tietokanta voidaan palauttaa alkuperäiseen muotoonsa, jos ongelmia esiintyy muutosten seurauksena. ETO-tuotteissa vaihtuvuus on usein suurta ja jatkuvan tietokannan päivittämisen välttämiseksi pysyvä säännöstö, kuten standardit kirjataan erilleen usein vaihtuvasta datasta, kuten materiaalien hinnoista. Tästä syystä Rulestreamiin on luotu kolme itsenäistä tietokantaa, mikä parantaa tuotemallin ylläpidettävyyttä. Perinteiset konfiguraattorit ovat usein raskaita generoivia, kun laskenta on sisällytetty samaan tietokantaan suunnittelusääntöjen tai suoraan 3D-malleihin. Rulestream hyödyntää omaa erillistä laskenta-alustansa, jossa laskenta on perinteiseen konfiguraattoriin verrattuna tehokkaampaa, mikä tekee ohjelmiston käytöstä sujuvampaa. (Karvonen ja Renko 2016.)

Useissa tapauksissa Rulestreamia käytetään pelkästään laskenta-automaattina tehokkaan laskenta-alustansa ansiosta mutta myös ohjelmiston CAD-automaatio on kehittynyt. Rulestreamin CAD-integraatiolla voidaan automaattisesti muun muassa lukea ja muokata CAD-dataa, tuottaa viimeisteltyjä ja tarkkoja 3D-malleja sekä valmistuspiirustuksia, kopioida tai luoda uusia nimikkeitä mallien pohjalta, luoda tuoterakenteita, osalistoja ja myynti- tai tuotantodokumentteja, kuten tarjouspyyntöjä arvioitujen tuotantokustannusten pohjalta tai suunnittelusääntöjen ja -parametrien yhteenvetoja. Integraatio on valmiina SolidWorks-, NX-, SolidEdge- ja PTC Creo -CAD-ohjelmistoihin. Rulestream ajaa kyseisiä CAD-ohjelmistoja tarpeen mukaan erillisessä ikkunassa. Lisäksi Rulestream sisältää DWG-moduulin, jolla piirustukset voidaan luoda AutoCAD-ohjelmiston vaatimassa tiedostomuodossa. DWG-moduuli ei kuitenkaan käytä tai vaadi AutoCAD-ohjelmistoa. Rulestreamista löytyy myös valmis Teamcenter-integraatio, mutta Rulestreamin käyttö ei vaadi Teamcenteria vaan se voidaan yhdistää myös esimerkiksi muihin PDM-järjestelmiin. Lisäksi Rulestreamissa on integraatio Microsoftin Visio -ohjelmaan, joka on parametrinen 2D-suunnittelutyökalu. Visiolla voidaan ohjata Rulestreamin kautta 3D-mallinnus-ohjelmistoa ja tuloksena saadaan nopeita 3D-malleja JT-tiedostomuodossa. Rulestreamiin voidaan integroida myös yrityksen sisäisiä ohjelmia, jotka suorittavat laskentoja, hakuja tai muita suunnittelun kannalta tärkeitä toimintoja. Myynti- ja tuotantodokumentin voidaan tulostaa automaattisesti Microsoft Word -integraation avulla. (Karvonen ja Renko 2016.)

Rulestreamin toiminta on vahvasti sääntöpohjaista. Tuotetietoa ja suunnittelusäännöstöä hallitaan CAD-ohjelmiston ulkopuolisiin tietokantoihin luodun tuotemallin avulla. Tietokantaan voidaan syöttää esimerkiksi useita eri standardeja, jolloin tuotemallia ajaessa voidaan valita minkä standardin mukainen tuote automaattilla halutaan tuottaa. Ohjelmisto pystyy myös hyödyntämään tehokkaasti parametrisoituja emomalleja sekä muuta emodataa ja luomaan niiden perusteella uusia malleja ja piirustuksia. Suunnittelukonfiguraattorina toimiminen on yksi osa Rulestream-ohjelmistoa. Ohjelmisto muistaa sillä generoidut 3D-mallit ja piirustukset ja siten pystyy päivittämään luodut dokumentit tarvittaessa uusien suunnittelusääntöjen mukaisiksi. Tällaisessa tapauksessa emomallien ja muun emodatan tai yksittäisten CAD-dokumenttien noutaminen PDM-järjestelmästä on mahdollista integraatiolla Teamcenteriin, mutta se voidaan toteuttaa myös muiden tuotetiedonhallinta-

ohjelmistojen kanssa. Rulestreamissa luotujen dokumenttien ja nimikkeiden siirto eteenpäin ERP-järjestelmään on vaivatonta varsinkin, jos yrityksessä on käytössä myös Teamcenter. Rajapinta on kuitenkin avoin ja integraatio ERP:n kanssa onnistuu myös ilman Teamcenteria. (Karvonen ja Renko 2016.)

Rulestreamia voidaan käyttää joko paikallisesti asennetun tai WEB-selaimella toimivan käyttöliittymän kautta. Molemmissa käyttöliittymissä käyttäjien oikeuksia voidaan rajoittaa koskemaan vain niitä toimintoja, joita kukin käyttäjä tarvitsee. Käytettäessä WEB-käyttöliittymää selaimella otetaan yhteys yrityksen serveriin, joka sisältää tuotemallin suunnittelusääntöineen. Tällöin suunniteltava tuote päästään konfiguroimaan serverillä käyttäjän syöttämien valintojen mukaisesti. Myös 3D-mallien ja valmistuspiirustusten konfigurointi serverillä on mahdollista WEB-käyttöliittymän kautta. (Karvonen & Renko 2016.) Ohjelmiston toimintaa kuvataan tarkemmin seuraavan kappaleessa esitetyn Metso Mineralsin käyttöönottokokeilun avulla.

Metso Mineralsin käyttöönottokokeilu kierrätyskoneen suunnittelussa

Metsolla on aiempaa kokemusta Rulestreamin käytöstä, sillä Metso Minerals suoritti Rulestream-käyttöönottokokeilun Saksassa Düsseldorfin toimipisteellä metallinkierrätyslaitteen suunnittelun tehostamiseksi. Kokeilu suoritettiin neljän viikon aikana vuosien 2015 ja 2016 vaihteessa. Metso Minerals on maailman johtava metalliromun kierrätyslaitteiden valmistaja. Tuotteesta löytyy suuri määrä variaatioita ja lisäksi sitä räätälöidään asiakkaan erityistarpeita vastaaviksi, mikä vaatii suuren määrän toimipisteen insinöörikapasiteetista. Käyttöönottokokeilun tavoitteena oli osoittaa, että suunnitteluautomaatiolla voidaan vähentää tilauskohtaisen suunnittelun vaatimia resursseja, jolloin niitä voidaan kohdentaa enemmän esimerkiksi tuotekehityksen tarpeisiin. Käyttöönottokokeilu toteutettiin yhteistyössä Ideal PLM:n kanssa. Yritys tarjosi tarvittavat Rulestream demolisenssit kokeilun suorittamiseen. Tässä luvussa esitetyt asiat perustuvat pääosin Metso Mineralsin työntekijöiden kanssa 3.11.2016 käytyyn keskusteluun ja heiltä saatuun Metson sisäiseen käyttöönottokokeiluraporttiin.

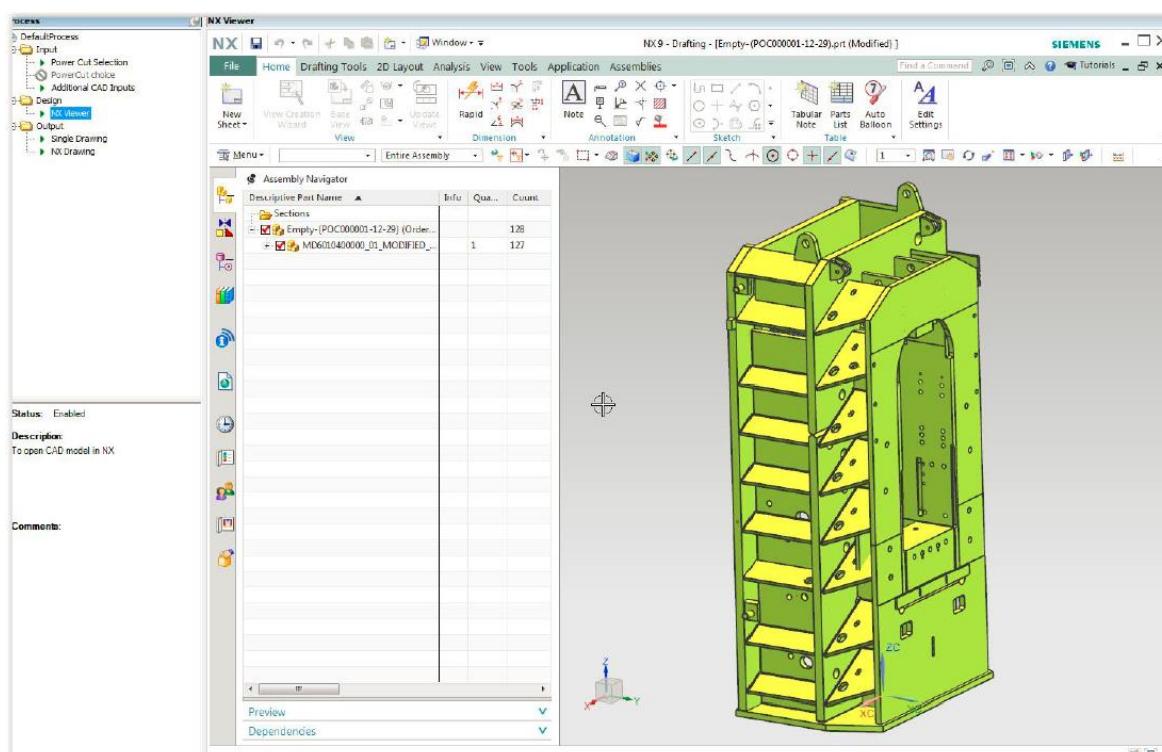


Kuva 21 Metson Lindemann PowerCut metallinkierrätyslaite, komponentit vasemmalta oikealle: voimanlähde, puristin ja leikkuri (Metso Recycling 2017)

Käyttökokeilun kohteena oli Metson Lindemann PowerCut metallinkierrätyslaite, joka on suurikokoinen ja raskastekoinen kolmesta pääosasta, eli hydraulisesta tai sähköisestä voimanlähteestä, puristimesta ja leikkurista koostuva kokonaisuus. Kokeilun kohteeksi valittiin leikkuri, joka on Kuvassa 21 oikeassa laidassa oleva korkea komponentti. Kokeilussa toteutetut ominaisuudet olivat:

- tuotemalli suunnittelusäännöille
- malliautomaatio
- piirustusautomaatio
- Teamcenter-integraation käyttöönotto
- FEM-analyysin automatisointi
- laskenta-automaatti pultituksille.

Tietokanta suunnittelusäännöille luotiin hajautetusti Rulestreamin kehityisperiaatteiden mukaisesti. Rulestreamin tuotemallin avulla ohjelmisto pystyy yhdistämään pysyvien ja vaihtuvien suunnittelusääntöjen tietokantojen, käyttäjän käyttöliittymän kautta antamien parametrien sekä CAD-tiedostojen kautta saatavat säännöt uuden tuotteen luomiselle. Malliautomaation osalta päädyttiin 8 esimääritettyyn konfiguraatioon, joiden pohjalta uudet 3D-mallit tuotettiin parametrisoiduista malleista. Ohjelmistoon sisällytettiin käyttöliittymä konfiguraatioiden lisäämistä varten, sillä kustomointia vaativat asiakasvaatimukset haluttiin mahdollistaa automaattilla tuotettuihin kokonaisuuksiin. Saksan toimipisteellä käytetään 3D-mallinnukseen NX-suunnitteluohjelmistoa, joten integraatio CAD-ohjelmistoon löytyi Rulestreamista valmiina (Kuva 22).



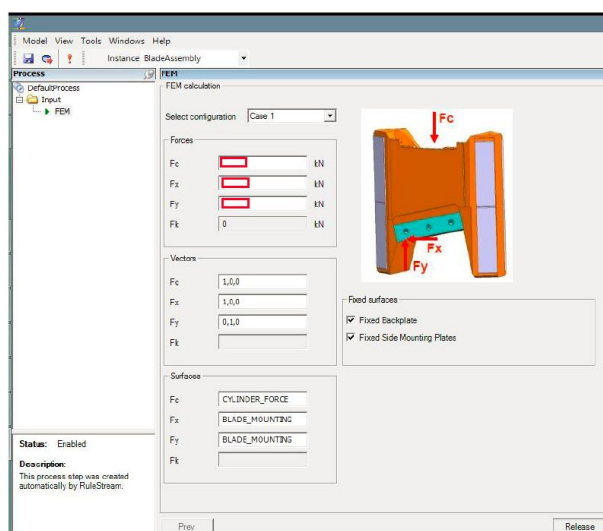
Kuva 22 Rulestreamin integraatio NX-suunnitteluohjelmistoon

Piirustusautomaatilla haluttiin tuottaa yksittäisten osien valmistuspiirustukset mitoituksineen ja pinnanlaatumerkintöineen. Käyttöönottokokeilun yhteydessä piirustusautomaatio toteutettiin tukirivan osalta esimerkkinä automaation toimivuudesta.

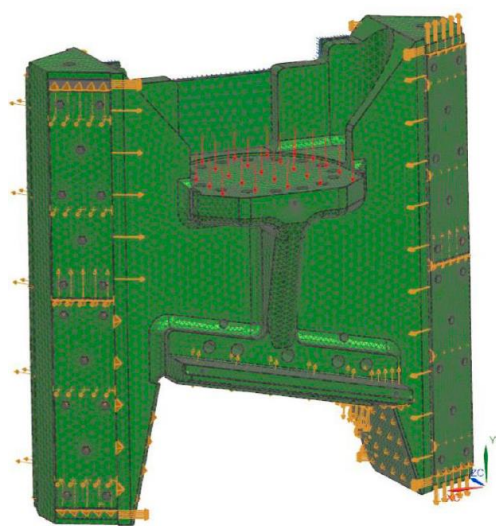
Pinnanlaatumerkintöjä käytettiin esimerkkinä siitä, etteivät mitoista irralliset symbolit tuota ongelmaa automaatile. Automaatilla tuotettiin myös kokoonpanokuvia eri kokoisia piirustus pohjia hyödyntäen luomalla useita kuvantoja tuotteesta erilaisilla mitoituksilla. Kokoonpanokuvaan sisällytettiin myös hitsausmerkinnät. Pienet manuaaliset muokkaukset kuvien viimeistelyyn sallittiin, sillä Ideal PLM:n mukaan CAD-automaatin kehitystyöstä jopa 80% kuluu piirustusautomaation luomiseen, jos piirustukset halutaan toteuttaa täydelliseksi (Karvonen ja Renko 2016). Täten vähäisiä aikaresursseja ei haluttu tuhata jo toimivaksi osoitettuun automaation luomiseen.

Alunperin tarkoituksena oli ottaa Teamcenter-integraatio käyttöön siten, että kaikki käytettävät CAD-dokumentit haetaan Teamcenteristä ja luodut dokumentit pystytään tallentamaan suoraan Teamcenteriin. Luodussa tuotemallissa havaittiin kuitenkin ongelmia, joiden vuoksi integraatiota ei voitu ottaa käyttöön suunnitellussa laajuudessa. Siitä huolimatta integraation toimintaa havainnoillistettiin luomalla uusi Rulestream-sovellus, jolla aiemmin luotuja osa- ja kokoonpanomalleja sekä -piirustuksia voitiin hakea sovelluksesta ja tuoda CAD-järjestelmään. Lisäksi osoitettiin kuinka uusia dokumentteja voidaan tallentaa sovellukseen.

Suurena haasteena ohjelmistolle asetettiin FEM-analyysien automaattinen suorittaminen. FEM-analyysi haluttiin suorittaa leikkurin teräosalle, johon kohdistuu suuria kuormituksia leikkurin paloittelussa tiivistettyä metalliromua. Analyysi suoritetaan tarkistuksena heti sen jälkeen, kun uusi teräosa on luotu Rulestreamissa. FEM-analyysia varten luotiin oma käyttöliittymä, joka näkyy Kuvassa 23. Käyttöliittymässä syötetään käsin analyysin vaatimat parametrit, jonka jälkeen automaatti luo verkotuksen automaattisesti. Verkotuksen jälkeen analyysi ajetaan automaattisesti (Kuva 24) ja tulokset ovat nähtävillä Rulestreamin CAD-ikkunassa.

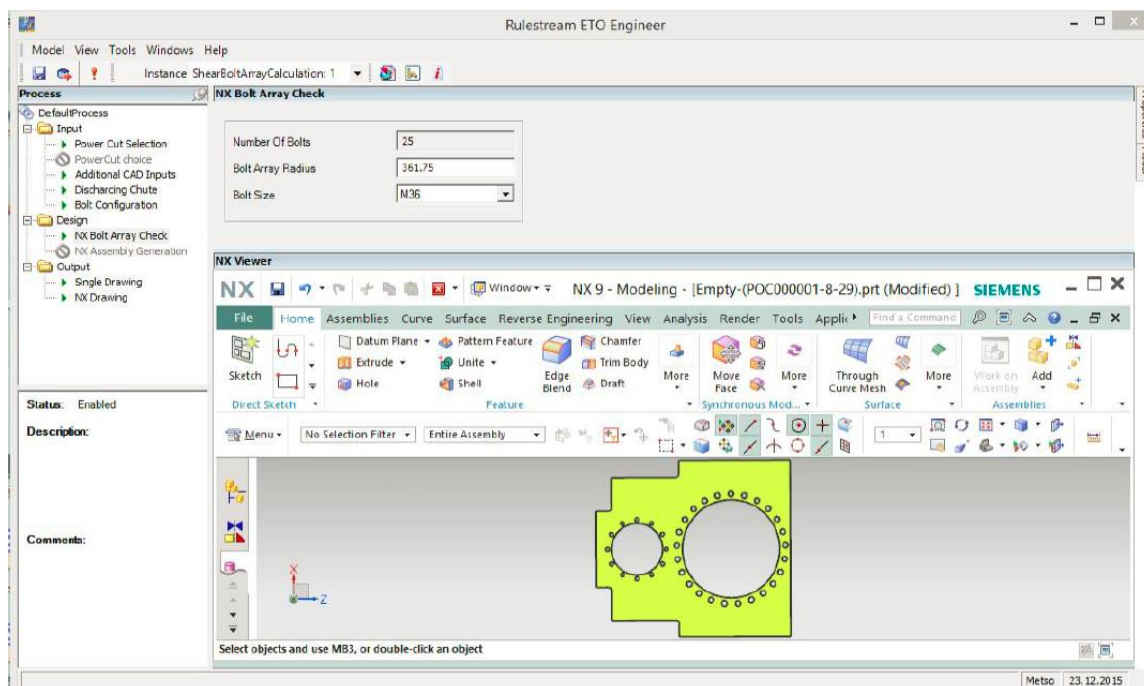


Kuva 23 Syöttöparametrit FEM-analyysia varten



Kuva 24 3D-mallin automaattinen verkotus

Perinteisen insinöörilaskennan automatisoinnin esimerkkinä käyttöönottokokeilussa luotiin Kuvan 25 mukainen laskenta-automaatti ja konfiguraattori pultituksia varten. Käytössä olevat pultit on määritetty taulukkoon, josta automaatti valitsee käyttöön sopivimmat käyttäjän syöttämien parametrien perusteella. Laskennan tulos voidaan tarkistaa visuaalisesti konfiguroimalla kiinnityslevy laskennan mukaiseksi CAD-integraation avulla.



Kuva 25 Laskenta-automaatin tulosten visuaalinen tarkastus CAD-integraation avulla

Mainittujen ominaisuuksien lisäksi käyttöönottokokeiluun oli tarkoitus sisällyttää myös muun muassa myyntikonfiguraattorin integrointi ja Microsoft Office -integraation käyttöönotto siten, että tuotteen suunnittelumäärittely saadaan tulostettua Word-tiedostona. Näistä vähemmän tärkeiksi arvioituista ominaisuuksista jouduttiin käyttöönottokokeilun puitteissa luopumaan ajanpuutteen vuoksi. Kokeilussa esitettyjen ominaisuuksien toteuttamiseksi kaupallisista Rulestream-lisensseistä vaaditaan Rulestream Rule Author, Rulestream End User, Rulestream Automation for NX ja Rulestream Automation for Teamcenter.

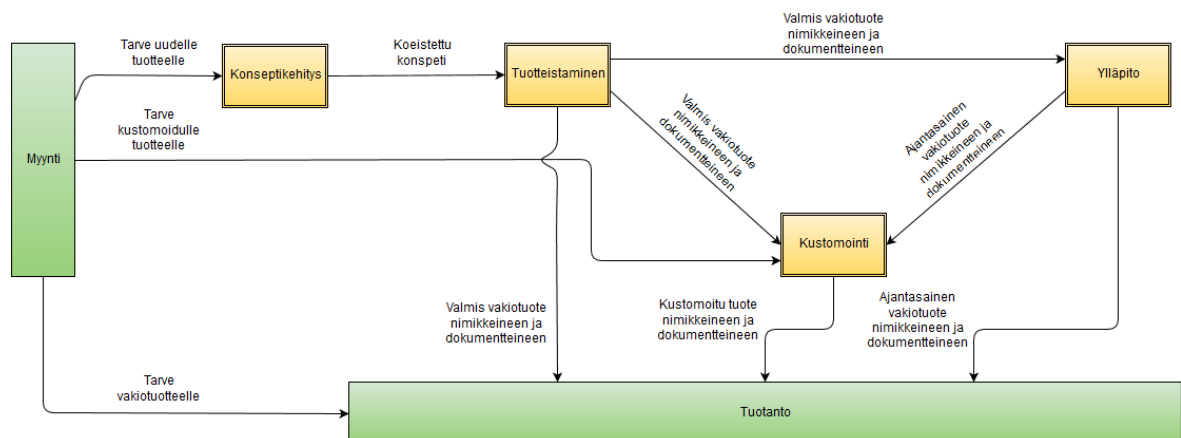
Käyttöönottokokeilun lopputuloksiin oltiin Metsolla tyytyväisiä, vaikka lyhyen aikaikkunan vuoksi kaikkia toimintoja ei pystytty ottamaan käyttöön suunnitellussa laajuudessaan. Kokeilu osoitti, kuinka CTO- ja ETO-tuotteiden suunnitteluprosessia voidaan nopeuttaa ja tehostaa automaatiotyökaluilla. Kokeilulla pystyttiin myös todistamaan, että yrityksen sisäiset suunnittelusäännöt ovat kerättävissä yhteen tietokantaan ja niiden pohjalta insinöörisuunnittelua voidaan automatisoida myös Metsolla. Ohjelmistoa luodessa havaittiin kuinka raskaaksi ja ylläpidoltaan monimutkaiseksi järjestelmä tulee, jos monipuolisesti muunneltavissa olevan tuotteen logiikka sisällytetään pelkästään konfiguroitaviin ja parametrisoituihin emomalleihin. FEM-analyysin automatisoinnissa havaittiin, että 3D-mallien 100% oikeellisuus ilman pintojen päällekkäisyyksiä on äärimmäisen tärkeää luotettavien tulosten saavuttamiseksi. Pintojen päällekkäisyys tekee verkotuksesta virheellisen tai verkotus ei onnistu lainkaan. Verkotuksen helpottamiseksi analyysipisteet tulisi luoda 3D-malleihin valmiiksi. Pienet virheet, kuten pintojen päällekkäisyydet on helppo korjata siistimällä mallia käsin, mutta sen automatisointi on hyvin aikaa vievää. Täten on syytä arvioida tarkkaan saavutetaanko FEM-analyysin automatisoinnin avulla toivottuja resurssisäästöjä. Leikkurin osalta suunnitteluautomaatin luominen yhdenmukaisti tuotetta ja standardisoi sen muunneltavuutta, mahdollistaen nopeamman vastaamisen asiakaskohtaisiin vaatimuksiin. Valitettavasti Rulestream-käyttöönottokokeilu ei kuitenkaan aiheuttanut jatkotoimenpiteitä suunnitteluautomaattien laajemman käytön puolesta. Tähän syynä ei ollut automaatin toiminta vaan Metso

Mineralsin linjaus, jonka mukaan kyseisen tuotelinjan tuotteiden ennaltamäärättyjen konfiguraatioiden ulkopuolisen tarjonnan suhteellista osuutta kokonaistarjonnasta halutaan merkittävästi pienentää.

3.3 Ohjelmiston valinta

3.3.1 Valintakriteerit

Venttiilien insinöörisuunnittelu MFC:lla voidaan jakaa neljään eri osa-alueeseen: konseptikehitykseen, tuotteistamiseen, kustomointiin sekä ylläpitoon (Kuva 26). Konseptikehityksessä luodaan uusia tuotteita markkinoilla havaittuihin tarpeisiin tai pyritään uudistamaan olemassa olevia tuotteita vanhan tuoterakenteen laajamittaisen kriittisen tarkastelun myötä kilpailukyvyn parantamiseksi. Konseptikehityksessä suunnittelutyö perustuu venttiilin käyttöympäristön fysikaalisiin ominaisuuksiin esimerkiksi putkistossa kulkevan väliaineen paineen, lämpötilan, kemiallisen koostumuksen ja viskositeetin sekä putkiston koon osalta. Tuloksena on prototyyppien avulla koeistettu ja toimivaksi todettu tuoteaihio eli konsepti (Kuva 26), josta saadaan jatkojalostettua yksityiskohtaisen suunnittelun ja testaamisen avulla markkinoille uusi tuote tai tuotesarja erilaisine konfiguraatioineen. Tätä uuden konseptin kehittämistä tuotantovalmiiksi myytäväksi tuotteeksi kutsutaan tuoterealisoinniksi eli tuotteistamiseksi. Tuotteistamisvaiheessa määritetään uuden tuotteen tai tuotesarjan laajuus ja variantit eli ne tuotekonfiguraatiot, joita asiakkaalle halutaan tarjota oletetusta poikkeaviin olosuhteisiin katalogista löytyvänä vakiotuotteena. Tuotteistamisvaiheessa on tarkoituksena luoda venttiili- ja osanimikkeet yksityiskohtaisine valmistusdokumenteineen kaikille tuotteen peruskonfiguraatioille valmiiksi asiakastilausten toteuttamisen nopeuttamiseksi. MFC:n strategiaan kuuluu tarjota asiakkaalle vaihtoehtoja myös perustuotteiden ulkopuolelta, jos katalogituotteista ei löydy sopivaa vaihtoehtoa asiakkaan tarpeisiin. Näiden perustuotteista poikkeavien tilausten suunnittelu on kustomoinnin tehtävä. Asiakkaan pyytämät kustomoinnit tuotteeseen ovat hyvin vaihtelevia ja osittain vaikeasti ennustettavissa. Ylläpidon tehtävänä on varmistaa, että olemassa olevan tuotekannan nimikkeistö ja dokumentaatio on ajantasaista.



Kuva 26 MFC:n insinöörisuunnittelun osa-alueet

Työn aikana haastateltiin kunkin osa-alueen edustajia MFC:lla ja haastattelujen perusteella luotiin 11 kappaletta käyttötapausesimerkkejä (use case). Tehdyistä käyttötapausesimerkeistä 4 on nähtävillä liitteessä 2 – yksi kunkin suunnitteluosa-alueen tyypillisestä työtehtävästä. Käyttötapausten perusteella huomattiin, että jokaisen osa-alueen toimenpiteitä

pystytään tehostamaan suunnitteluautomaation avulla. Lisäksi kirjattujen käyttötapauksen avulla pystyttiin paremmin demonstroimaan suunnitteluautomaation käyttöä ja mahdollisuuksia yhteistyökumppaneille ja ohjelmistontarjoajaryityksille. Käyttötapauksen, haastattelujen ja yleisen keskustelun perusteella luotiin ohjelmiston vaatimuslista, joka on nähtävillä liitteessä 1. Yleisellä tasolla esille nousi ohjelmiston globaalin käytön aiheuttamia vaatimuksia esimerkiksi maailmanlaajuisen tukipalveluiden, WEB-pohjaisen käyttöliittymän ja ohjelmiston nykyisten käyttäjäryitysten muodossa. Ohjelmiston halutaan myös olevan mahdollisimman riippumaton muista ulkopuolisista ohjelmistoista ja olemassa olevat integraatiot muihin järjestelmiin nähtiin eduksi. Lisäksi tietoturva aiheuttaa tiettyjä rajoitteita ohjelmiston käytölle ja toiminnalle. Seuraavissa kappaleissa on esitetty tarkemmin MFC:n eri suunnitteluosa-alueiden toimintaa ja niiden erityisvaatimuksia suunnitteluautomaatiolle.

Konseptikehitys

Konseptikehityksessä uudet venttiilit sekä venttiilipäivitykset suunnitellaan fysikaalisiin faktoihin, painelaitestandardeihin ja oletettuihin käyttöolosuhteisiin perustuen. Näin ollen on äärimmäisen tärkeää, että suunnittelusäännöt voidaan sisällyttää selkeässä ja ylläpidettävässä muodossa tuotemalliin. Suunnittelusäännöt koostuvat muun muassa painelaitestandardista löydettävistä rajoitteista ja taulukkoarvoista, lujuus- ja lämpölaajenemislaskennasta, työkaluille tarvittavista tilavarauksista ja käyttöolosuhteoletuksista, joten tuotemalliin pitää pystyä sisällyttämään tietoa hyvin erilaisissa muodoissa. Konseptikehitys on usein iteratiivista laskentaa ja tarkastelua, jossa pyritään löytämään optimaalista konstruktia suunnittelusääntöjen sallimissa rajoissa. Siten suunnitteluautomaatilta vaaditaan tehokasta ja nopeakäyttöistä laskenta-alustaa. Integraatio FEM-ohjelmistoon vaaditaan iteratiivisten lujuuslaskentaprosessien mahdollistamiseksi ja optimaalisten geometrioiden löytämiseksi. Manuaalinen konstruktion optimointi iteroimalla on hyvin työlästä ja näin ollen usein tyydytään tarkastelemaan vähäistä määrää säännösten toteuttavia vaihtoehtoja, jolloin osa tuotteen kilpailukykyä voi jäädä hyödyntämättä. Lisäksi säännöstöön tehtyjen muutosten vaikutukset konstruktion tulee olla nopeasti visualisoitavissa 3D-kokoonpanona venttiilistä, mikä vaatii integraatiota CAD-järjestelmään ja tehokasta konfigurointia. Myös kustannusarvio toteutetun konstruktion valmistuskustannuksista olisi eduksi.

Tuotteistaminen

Tuotteistamisvaiheen toiminnot alkavat parhaan suunnittelusäännösten täyttävän konseptin löytämisen jälkeen, jolloin kaikki perusvariaatiot tuotteesta on toteutettava tuotantokelpoiseksi konseptin perusteella. Tässä vaiheessa suunnitteluautomaatin odotetaan toimivan tehokkaana sarjasuunnittelun työkaluna tuotemalliin kerättyyn säännöstöön nojaten. Tuotevariaatioita MFC:n venttiileihin luovat muun muassa vaihtoehdot virtausaukon kokoon, tuotteen materiaaleihin, akselin laakerointiin sekä tiivistykseen, sulkuelimen tiivistykseen ja putkilaippaliitoksiin sekä mahdollinen cryo-rakenne mataliin lämpötiloihin. Lähes kaikki vaihtoehdot vaikuttavat useampaan kuin yhteen venttiilin osaan, joten luotavia venttiilin ja siihen kuuluvien komponenttien nimikkeitä ja valmistusdokumentteja on suuri määrä. Näin ollen suunnitteluautomaatilta vaaditaan tuotteistamisvaiheessa tehokasta konfigurointikykyä sekä automaattista tuotenimikkeiden ja valmistusdokumenttien sarjatuottoa. Tuotettujen nimikkeiden ja valmistusdokumenttien, eli valmistus- ja kokoonpanopiirustusten sekä 3D-mallien ja -kokoonpanojen tulee olla 100%

oikeellisia, jotta tuotteet voidaan valmistaa niiden perusteella. Lisäksi tuotettujen valmistusdokumenttien tulee olla hyvien 3D-mallinnus- ja koneenpiirustuskäytäntöjen mukaisia. Tuotettujen dokumenttien tulee myös noudattaa sarjasuunnittelun periaatteita, jolloin käytetyt menetelmät ja merkintätavat ovat yhdenmukaisia läpi tuotesarjan. Automaatin toteuttamien piirustusten oletetaan olevan noin 95% valmiita, jolloin pienet manuaaliset säädöt ja lisäykset niihin sallitaan. Tuotteistamisvaiheessa on tärkeää, että automaatti pystyy tarkastamaan PDM-järjestelmästä olemassa olevat nimikkeet duplikaattien luomisen välttämiseksi. Lisäksi järjestelmän tulee pystyä viemään tuotetut nimikkeet ja dokumentit PDM-järjestelmään.

Kustomointi

Tuotekustomoinnissa käsitellään ne tilaukset, joihin perustuotteen vakiokonfiguraatiot eivät riitä. Näissä tapauksissa asiakas haluaa venttiiliinsä erikoismateriaaleja, lisäominaisuuksia kuten höyryvaippa tai huuhteluyhteet, vakiovaihtoehdoista poikkeavan putkilaippaliitoksen tai jonkin erikoiskonstruktion, kuten pidennetyn akselin tilanpuutteen vuoksi. Kustomoitavia tuotteita varten perustuotteesta tulee olla nopeasti saatavilla viimeisimpien sääntöpäivitysten mukainen nimikkeistö ja dokumentaatio. Olisi eduksi, jos suunnitteluautomaatille voidaan syöttää venttiilin tyyppikoodi, jonka perusteella perustuotteen rakenne kaikkine konfiguraatioineen on määritettävissä. Pääasiassa kustomoitavat tuotteet ovat yksittäistapauksia, joten niiden sisällyttäminen automaattiin ei ole järkevää. Toisaalta, jos yksittäisen kustomoinnin havaitaan toistuvan useasti, se tulee olla helposti lisättävissä automaattilla tuotettaviin perustuotteisiin lisäkonfiguraationa. Erityisen tärkeää on, että automaattilla voidaan tuottaa nopeasti oikeellinen 3D-kokoonpano perustuotteesta, jolloin kustomoitavan tuotteen laatua pystytään manuaalisesti tarkastelemaan riittävällä tarkkuudella.

Ylläpito

Olemassa olevan tuotekannan nimikkeistön ja valmistusdokumenttien ylläpito on suuri osa MFC:lla tehtävästä suunnittelutyöstä. Suuri määrä valmiina olevia tuotenimikkeitä ja valmistusdokumenteja aiheuttaa MFC:lla ylläpidollisia haasteita, sillä aika-ajoin tuotteissa huomataan kehitystarpeita, jotka aiheuttavat muutoksia lukuisiin tuotteisiin. Ylläpidon tehtävänä on pitää huolta nimikkeistön ja valmistusdokumenttien ajantasaisuudesta, mutta johtuen suuresta dokumenttien määrästä kaikkien päivittäminen ei ole aina manuaalisesti mahdollista. Ongelman ratkaisemiseksi suunnitteluautomaatilla luodut dokumentit tulee pystyä päivittämään ja revisioimaan massa-ajona automaattisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että automaatin tulee muistaa sillä luodut dokumentit sekä pystyä havainnoimaan mihin dokumentteihin tehty muutos konstruktiossa vaikuttaa. Tällä ominaisuudella voidaan nopeuttaa myös tuotteistamisvaihetta, sillä siinä tehdään usein korjauksia tuotteeseen vielä sen jälkeen kun ensimmäiset valmistusdokumentit tuotteesta on jo luotu. Suunnitteluautomaatilla toteutettuihin dokumentteihin tehdyt manuaaliset muutokset tulee säilyttää dokumenteissa, jos päivitys ei koske kyseisiä piirteitä, mitoituksia tai merkintöjä.

3.3.2 Vertailumenetelmät

Vertailtaessa eri ohjelmistoja on huomioitava, että absoluuttisesti parasta ohjelmistoa ei voida määrittää. Ohjelmistovalinnassa määräävä tekijä on aina kyseisen käyttökohteen vaatimukset ja tarpeet. Ohjelmiston toimintaa tulee peilata olemassa oleviin järjestelmiin sekä käyttäjien kokemuksiin ja tarpeisiin. Tässä työssä lopullinen ohjelmistovertilau tehtiin kolmen toisistaan hyvin erilaisen kaupallisen ohjelmiston CadWorksin AutomateWorksin,

Tacton Systemsin Tacton Design Automationin sekä Siemens PLM Softwaren Rulestream ETO:n välillä. Arviointi perustuu yhteensä yhdeksään suoritettuun asiantuntijahaastatteluun, jotka ovat listattuna alla:

- AutomateWorks
 - 1 CadWorks Oy, 27.10.2016
 - 2 Entop Oy, 1.11.2016
 - 3 Entop Oy, 16.12.2016
- Tacton Design Automation
 - 1 PLM Group, 2.11.2016
 - 2 Tacton Systems AB, 16.11.2016
 - 3 PLM Group, 20.12.2016
- Rulestream ETO
 - 1 Ideal PLM, 1.11.2016
 - 2 Metso Minerals, 3.11.2016
 - 3 Ideal PLM 15.12.2016.

Näiden asiantuntijahaastattelujen perusteella arvioitiin liitteessä 1 näkyvän vaatimuslistan mukaan kunkin ohjelmiston soveltuvuutta MFC:n käyttöön. Arvioinnin ja vertailun kautta saatiin suuntaa-antavaa tietoa ohjelmistojen toimivuudesta. Ohjelmistojen pisteyttämistä ei koettu mielekkääksi, sillä ohjelmistot arvioitiin lähtökohdiltaan niin erilaisiksi, että suora pistevertilu ei anna oikeaa kuvaa valinnasta.

3.3.3 Valittu ohjelmistokokonaisuus

Ohjelmistoesittelyiden, vaatimuslistan arvioinnin, yrityksen sisäisten keskustelujen sekä syvällisen harkinnan perusteella MFC:lle sopivimmaksi suunnitteluautomaatio-ohjelmaksi arvioitiin Siemens PLM Softwaren Rulestream ETO (jatkossa Rulestream). Lisäksi päädyttiin ratkaisuun, jossa käyttöönottokokeilu toteutetaan ohjelmistokokonaisuudella, jossa Rulestream toimii suunnitteluautomaattialustana, Teamcenter PDM-järjestelmänä ja SolidWorks CAD-ohjelmistona. Rulestreamin valintaa tukeviksi seikoiksi arvioitiin erityisesti seuraavat tekijät:

- 1 Monipuolinen mahdollisuus suunnittelusäännösten sisällyttämiseen mukaan lukien fysikaaliset kaavat ja niiden geneerinen hyödyntäminen
- 2 Yksinkertainen ja ylläpidettävä tuotemallin rakennusympäristö
- 3 Valmis Teamcenter-integraatio PDM-automaation kokeilemiseksi
- 4 Valmiit integraatiot useisiin eri CAD-ohjelmiin
- 5 Mahdollisuus suunnitteluautomaatioon myös ilman CAD-integraatiota pelkkään laskentaan ja nimikkeiden luontiin
- 6 Tehokas oma laskentaydin
- 7 Riippumattomuus muista laskenta- tai taulukko-ohjelmista
- 8 Kolme itsenäistä, mutta keskenään tietokantaa suunnittelusäännöille, muuttuvalle tai taulukoitavalle datalle sekä projekti- tai asiakaskohtaiselle datalle
- 9 Referenssit alan tutkimuksista sekä maailmanlaajuisesta menestyksestä
- 10 Ideal PLM:n ammattitaito ja kokemus, sekä mahdollisuus tukea käyttöönotto-kokeilun toteutusta
- 11 Vähäinen resurssitarve käyttöönottokokeilun toteuttamiseksi
- 12 Metson aikaisemmat positiiviset kokemukset ohjelmistosta
- 13 Kattavat globaalit ohjelmiston tukipalvelut

- 14 Olemassa olevaan MFC:n Tacton-myyntikonfiguraattoriin ei pystytä sisällyttämään tarvittavaa suunnittelusäännöstöä, koska järjestelmästä tulisi liian raskas.

Valinnan perusteella diplomityön tekijä sekä työn ohjaaja osallistuivat Ideal PLM:n järjestämälle neljän työpäivän mittaiselle kurssille, jossa opeteltiin Rulestream-ohjelman perusteet rakentamalla yksinkertaisia suunnitteluautomaatteja. Koulutuksesta saatujen oppien perusteella käynnistettiin käyttöönottokokeilun toteutusvaihe.

4 Ohjelmiston käyttöönottokokeilu

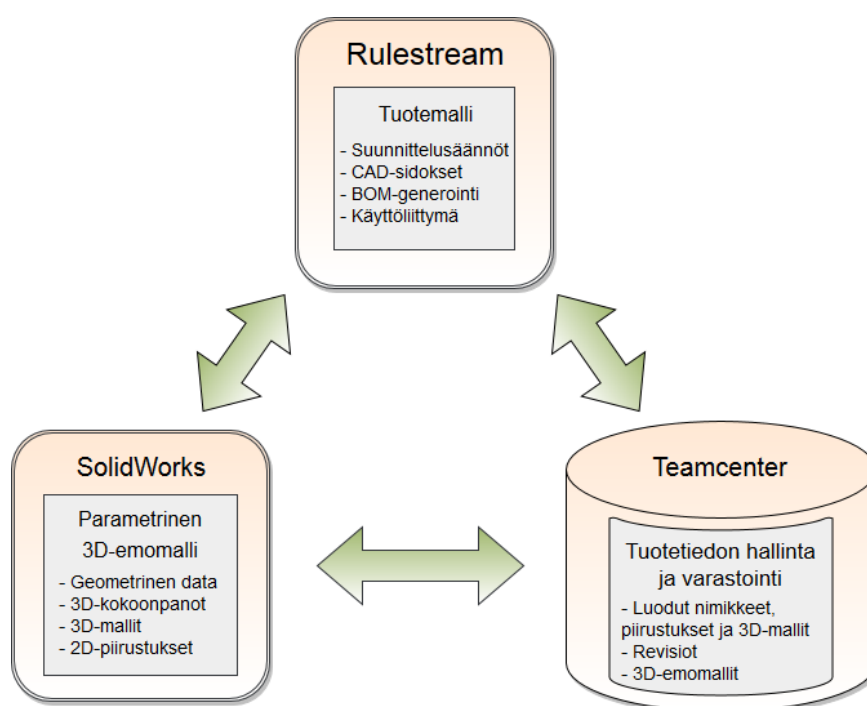
Parhaiten MFC:lle sopivan ohjelmiston valinnan jälkeen toteutettiin käyttöönottokokeilu eli POC engl. *proof-of-concept*. Sopivimmaksi ohjelmistoksi valittiin Siemens PLM Softwaren luoma Rulestream ETO ohjelmisto yhdistettynä Teamcenter PDM-ohjelmaan. Käyttöönottokokeilu toteutettiin viiden työviikon aikana diplomityöntekijän toimesta työn ohjaajan ja Ideal PLM:n edustajien avustamana. Ennen käyttöönottokokeilun implementointivaiheen alkua diplomityön tekijä ja ohjaaja osallistuivat 4 työpäivän mittaiseen Rulestream-koulutukseen Ideal PLM:llä.

4.1 Laajuus ja tavoitteet

Vaikka järjestelmään voitaisiin sisällyttää kaikki MFC:n venttiiliyhdistelmän komponentit, työn yhteydessä tehdyssä käyttöönottokokeilussa keskityttiin pelkästään venttiili-komponentin suunnittelun ja ylläpidon automatisointiin. MFC:n venttiilitarjonta on hyvin laajaa, joten työn puitteissa tehtävä käyttöönottokokeilu rajattiin koskemaan vain yhtä venttiilisarjaa tietyissä paine- ja kokoluokissa. Toteutettavaksi kokonaisuudeksi valittiin XA-sarjan tiivistetty laipallinen palloventtiili kokoluokissa 2", 3", 4", 6" ja 8" sekä paineluokkastandardeiksi ASME class 300 ja EN PN 40. Tiivistetulla palloventtiilillä tarkoitetaan yksiakselista venttiiliä, jonka sulkuelin on pallopintainen. Venttiilin painetta pitävä pesä koostuu kahdesta osasta pesän runkopuolesta, jota yrityksessä kutsutaan termillä Body ja sen vastinkappaleesta Body Cap. Pesän liitospinnan eli jakotason tiiveys varmistetaan paine- ja kokoluokkaan sopivalla pultituksella sekä erikoisvalmisteisella tiivisterenkaalla. Venttiilin virtauskanavan tiivistys perustuu sulkuelimen painautumiseen tiivistettä vasten putkessa vallitsevan paineen vuoksi. Venttiilin kokoluokka määrittyy virtausaukon halkaisijan koon mukaan ja paineluokka määrittää venttiilin materiaali-vahvuudet sekä kiinnitys- ja tiivistysmenetelmät.

Käyttöönottokokeilun tavoitteena oli demonstroida olemassa olevan tuotteen avulla, kuinka Rulestream ETO ja Teamcenter ohjelmien avulla voidaan merkittävästi vähentää tuotekehityksen läpimenoaikaa ideointivaiheesta valmistettavaksi tuotteeksi uusien ja päivitettävien tuotteiden osalta, kun suunnittelusäännöstö kerätään yhteen tietokantaan ja tuotteen valmistusdokumentit sekä nimikkeet luodaan automaattisesti. Valmistusdokumenteilla tarkoitetaan tässä tapauksessa venttiilin 3D-kokoonpanoja, venttiilin osien 3D-malleja ja koneistuspiirustuksia. Lisäksi haluttiin demonstroida tuotteen ylläpidon helpottumista ja itseään toistavan työn minimointia suurissa koko venttiilisarjaa koskevissa muutoksissa. CAD-ohjelmistona käyttöönottokokeilussa käytetään MFC:lla yleisessä käytössä olevaa SolidWorks-ohjelmistoa. Käyttöönottokokeilussa toteutettavassa kokonaisuudessa kaikki kolme ohjelmistoa ovat linkitettyinä toisiinsa ja tieto kulkee kaikkien kolmen ohjelmiston välillä molempiin suuntiin (Kuva 27). Merkittävimmissä roolissa käyttöönottokokeilun osalta toimii Rulestream, jossa tuotemalli luodaan ja ajetaan. Tuotemalli pitää sisällään suunnittelusäännöt ja -tiedon, laskennan, CAD-sidokset, BOM-generoinnin, käyttöliittymän ynnä muut tuotteen ominaisuudet ja konstruktion määräävät tekijät. Tuotemallilla käskytetään SolidWorksia, joka tuottaa emomalleja muokkaamalla käyttöliittymävalintojen sekä suunnittelusääntöjen mukaiset 3D-kokoonpanot, 3D-mallit sekä 2D-piirustukset. 3D-emomallit sisältävät pääosan tuotteen geometrisesta datasta, jolla tarkoitetaan esimerkiksi tuotteen muotoa, muokattavuutta ja ulkonäköä. SolidWorksistä halutaan pystyä myös noutamaan tietoa takaisin Rulestreamiin esimerkiksi tuotteen massan tarkastelua varten. Teamcenter toimii järjestelmässä PDM-järjestelmänä varastoiden ja

halliten Rulestreamilla ja SolidWorksillä tuotettua tuotetietoa, eli luotuja nimikkeitä, 3D-kokoonpanoja, -malleja ja 2D-piirustuksia sekä niiden revisioiden luontia ja historiaa. Nimikkeiden luontia varten Rulestream generoi tuotemallin pohjalta oikean tuoterakenteen ja osalistan eli BOM:n ja lähettää tiedon Teamcenteriin. Tuoterakenteen lisäksi Teamcenteriin siirtyy nimikkeiden yksilöintiin ja ominaisuuksiin liittyvät attribuuttitiedot. Datan pohjalta Teamcenterin tulee luoda oikeat nimikkeet järjestelmään ja lisäksi yhdistää SolidWorksiltä saatavat 3D-mallit ja piirustukset oikeisiin nimikkeisiin. Lisäksi Teamcenterissä säilytetään emomalleja ja -piirustuksia, joita muokkaamalla lopulliset valmistusdokumentit luodaan. Rulestreamin tulee saada tietoa Teamcenteriltä siitä, mitä nimikkeitä on valmiiksi olemassa, jotta tuotemalli osaa generoida nimikkeet järjestelmään luomatta toista samanlaista nimikettä eli duplikaattia. SolidWorksin pitää myös saada käyttöönsä Teamcenteristä emomallit- ja piirustukset uusien instanssien tuottamiseksi sekä 3D-mallit aiemmin luoduilta nimikkeiltä, jotta kokoonpanosta pystytään havaitsemaan mitkä osat ovat uusia ja mitkä olemassa olevia nimikkeitä.



Kuva 27 Käyttöönottokokeilun ohjelmistodiagrammi

Käyttöönottokokeilussa pyritään erityisesti osoittamaan suunnittelusäännöstön luomisen, varastoinnin ja ylläpidon toimivuutta Rulestreamin avulla. Valmistusdokumenttien ja nimikkeiden tulee syntyä Teamcenteriin automaattisesti tuotemallin suunnittelusääntöjen perusteella. Dokumenttien ylläpidon osalta koeisteittavat ominaisuudet ovat piirteiden lisääminen, piirteiden poisto, mittamuutokset, merkintämuutokset, lisäkonfiguraatioiden luominen sekä revisioiden luominen ja hallinta. Automaattisessa nimikkeiden luomisessa halutaan koeistaa konstruktiota varten tarvittavien, mutta PDM-järjestelmästä puuttuvien osanimikkeiden luonti, olemassa olevien nimikkeiden haku PDM-järjestelmästä sekä venttiilininimikkeiden luonti sisältäen BOM:n ja attribuuttitiedot. Venttiilin muunneltavuuden osalta venttiilin täydellinen 3D-kokoonpano sekä BOM tulee saada luotua kaikille käyttöönottokokeiluun valittuihin kokoluokkiin venttiilisarjan tyypillisten konfiguraatioiden, kuten pallotiiviste-, putkilaippa-, materiaali-, akselitiiviste- ja laakerointi-vaihtoehtojen mukaisesti. Näistä putkilaippavalinnan tulosta halutaan demonstroida

tuottamalla Body-osasta loppukoneistuspiirustus automaattisesti. Lisäksi säännösten toimivuutta tuotekehitystarpeisiin halutaan demonstroida lisäämällä vaatimukseksi järjestelmää ajaessa optimaalisen pesän jakotason ruuvien mitoituksen laskenta. Laskennan tulee täyttää ASME-painelaitestandardien asettamat vaatimukset sekä huomioida MFC:n sisäiset laskentaperusteet.

4.2 Toteutus

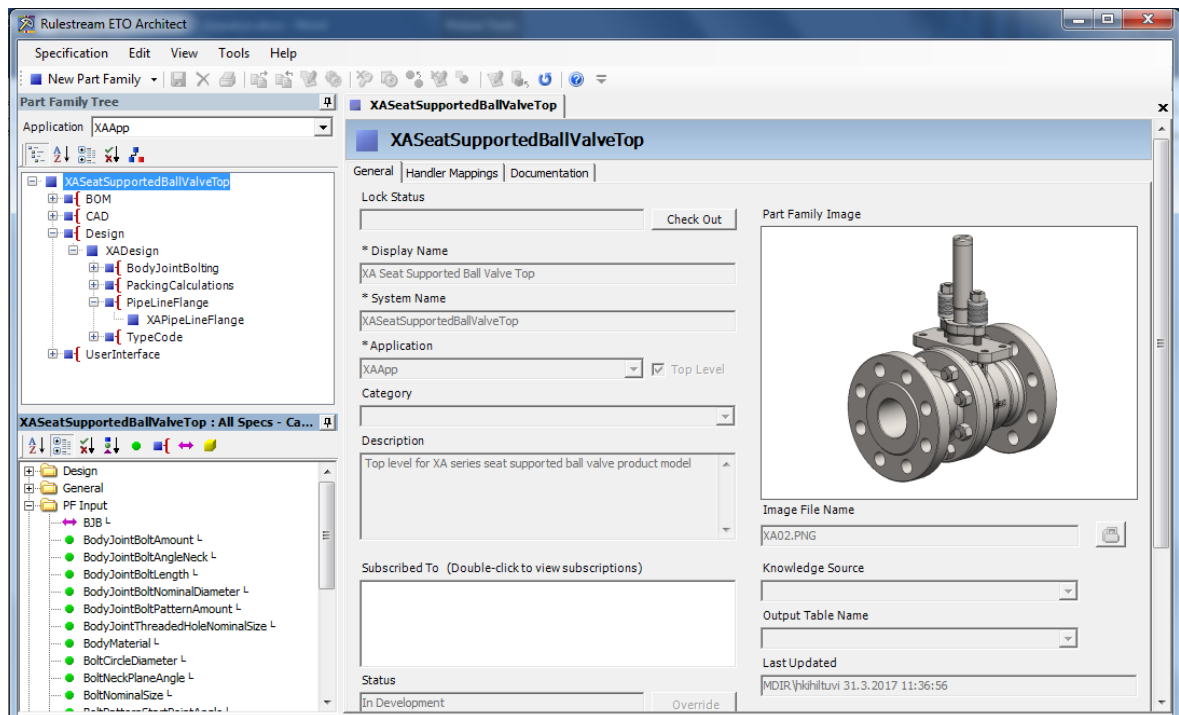
Rulestreamilla luotavan suunnitteluautomaatin toiminta perustuu Rulestream Architect -ohjelmalla luotavaan tuotemalliin. Suunnitteluautomaatin käyttö ja tuotemallin ajaminen tapahtuu loppukäyttäjille suunnatulla Rulestream Engineering -ohjelmalla. Tarvittavat Rulestream ja Teamcenter-lisenssit käyttöönottokokeilun toteuttamiseksi tarjottiin Ideal PLM:ltä. Rulestream lisensseistä käyttöönottokokeilun toteuttamiseen tarvittiin Rulestream Rule Author, Rulestream End User, Rulestream Automation for SolidWorks ja Rulestream Automation for Teamcenter. SolidWorks-lisenssit olivat valmiiksi saatavilla MFC:lla. Lisenssien lisäksi käyttöönottokokeilun toteuttamiseen hankittiin Tieto-ohjelmistoyritykseltä palvelin, jotta automaatin kehittäminen olisi sujuvaa ja reaaliaikaista, eikä esimerkiksi varmuuskopioinnista tarvitse kantaa huolta.

Suunnitteluautomaatin rakentamisen lähtökohta on tuotemallin rakenteen ja laajuuden päättäminen ja hahmottelu Rules-tietokantaan Rulestream Architect -ohjelmalla. Päätösten ei tarvitse olla lopullisia, sillä tuotemallin rakennetta ja laajuutta voidaan muuttaa automaattia luotaessa, mutta selkeä näkemys automaatille syötettävistä arvoista sekä halutuista lopputuloksista on eduksi heti kehitystyön alkuvaiheessa. Käyttöönottokokeilussa tuotemalliin luotiin ensimmäisenä rakennepuu, joka Ideal PLM:n ohjelmistokehittäjien suosituksesta jaettiin neljään haaraan:

- BOM; sisältää PDM-järjestelmän tarvitsemat tiedot oikeiden nimikkeiden ja osalistojen luomiseksi
- CAD; sisältää CAD-järjestelmän vaatimat tiedot oikeiden 3D-mallien, kokoonpanojen ja 2D-piirustusten luomiseksi
- Design; sisältää suunnittelusäännösten sekä laskennan
- UserInterface; sisältää käyttöjärjestelmään liittyvän datan.

Tämä nelihaarainen rakenne on hyvä lähtökohta minkä tahansa tuotemallin kehittämiseen, sillä jako on selkeä ja pitää tuotemallin helppolukuisena. Haarat sisältävät Part Family -komponentteja, joista tuotemallin rakenne koostuu. Ne ovat osa- tai tietokokonaisuuksia, jotka pitävät sisällään kokonaisuuteen liittyvät attribuutit ja säännöt (Siemens 2017, Mod 2). Tuotemallilla tulee olla vähintään yksi ylätaso eli Top-Level Part Family. Vain Top-Level Part Familylle voidaan luoda prosesseja, joilla automaattia voidaan ajaa (Siemens 2017, Mod 3). Tyypillisesti Top-Level Part Family on se kokonaisuus, jonka kokoonpano automaatilla halutaan toteuttaa (Siemens 2017, Mod 2). Part Familyiden nimeämisessä kannattaa käyttää yhteistä etuliitettä nimeämisissä tuotemallin sisällä, sillä Rulestream ei salli kahta samannimistä Part Familyä samassa kehitysympäristössä. Etuliitteiden käytöllä nimeämisessä mahdollistetaan keskenään samankaltainen rakenne tuotemalleille tapauksessa, jossa kehitysympäristö sisältää useampia tuotemalleja eli Rulestream applikaatioita. Lisäksi Top Level Part Familyn nimeen kannattaa lisätä loppuliite ”Top”, jolloin sen löytäminen listoja lukiessa helpottuu. Käyttöönottokokeilussa kehitysympäristöön luotiin kaksi tuotemallia ”XAApp” ja ”GeneralF”. Kaikki XAApp-tuotemallin Part Familyt on nimetty XA-etuliittellä. XAApp-tuotemalli sisältää kaiken XA-








palloventtiilisarjaa koskevan suunnittelutiedon ja GeneralF-tuotemalli sisältää yleistä dataa, jota voidaan kopioida päätuotemallin eri osioihin. Päätuotemalliin kopioitu tieto ohjautuu GeneralF-tuotemallin mukaan, joten tuotemallin ylläpito helpottuu huomattavasti ominaisuuksille, jotka toistuvat useissa kohdissa tuotemallia. Tätä geneeristä tuotemallia voitaisiin hyödyntää myös siten, että sen sisältämät tiedot voidaan kopioida useisiin eri tuotemalleihin, jotka kuvaavat esimerkiksi eri venttiilisarjoja. Näin ollen riittää, että useissa tuotemalleissa toistuvat tiedot luodaan vain kerran ja tiedot saadaan ylläpidettyä yhdestä paikasta kaikkiin tuotemalleihin. Tuotemallin hierarkisten suhteiden luomiseen Part Familyiden välille käytetään Subpart Collection -komponenttia. Niiden nimeämisessä ei ole rajoitteita, mutta nimen on suositeltavaa kuvata sen sisältämien Part Familyiden kokonaisuutta. Subpart Collectionilla määritetään myös sen sisältämien Part Familyiden lukumäärä rakenteessa tuotemallia ajettaessa.



Kuva 28 Rulestream Architect ikkunan perusnäkö ja XAApp-tuotemallin Top-Level Part Family

Kuvassa 28 on näkyvillä XAApp-tuotemallin Top-Level Part Family nimeltä "XASeatSupportedBallValveTop". Kuvan vasemmassa yläreunassa näkyy tuotemallin hierarkinen puurakenne sekä vasemmassa alareunassa Part Familyyn sidotut muut komponentit. Muita käyttöönottokokeilussa käytettyjä Rulestream-tuotemallin komponentteja ovat Part Familyyn ja Subpart Collectionin lisäksi Property, Connection, Database Constraint, SolidWorks Specification ja Teamcenter Specification. Komponentit Rulestreamissa esiintyvien kuvakkeiden kera on listattu kuvauksineen Taulukossa 1.

Taulukko 1 Rulestream-tuotemallin komponentit

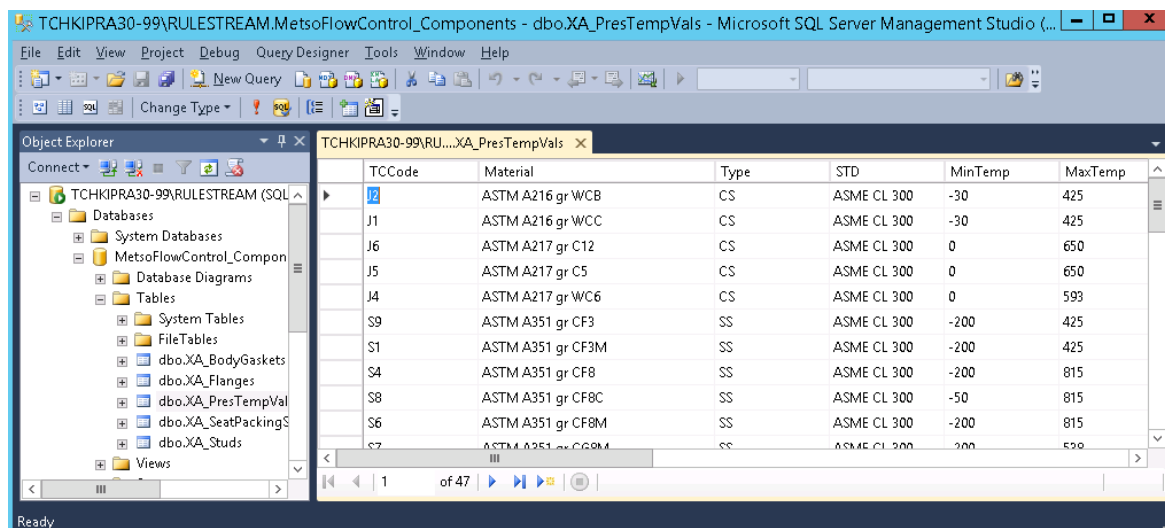
	Part Family	Tuotemallirakenteen yksikkö
	Subpart Collection	Rakenteen hierarkian määräävä komponentti
	Property	Geneerisesti hyödynnettävä muuttuja
	Connection	Linkki Part Familyiden välillä
	Database Constraint	Linkki Components-tietokantaan
	SolidWorks Specification	SolidWorksin tunnistama komponentti
	Teamcenter Specification	Teamcenterin tunnistama komponentti

Kaikki tuotemallin tarvitsemat säännöt ja attribuuttiarvot tallennetaan Property -komponentteihin, jotka ovat aina tiettyyn Part Familyyn sidottuja. Property on muuttuja, jonka arvo voidaan esimerkiksi asettaa vakioksi, määrittää funktiolla, laskea algebran, trigonometrian, matriisi- tai vektorilaskennan avulla, linkittää toiseen Propertyyn, hakea taulukkoarvosta tai asettaa vastaamaan käyttöliittymään syötettyä arvoa. Propertyä luotaessa sille täytyy määrittää nimi, tyyppi, datatyyppi, kategoria ja alkuarvo (Siemens 2017, Mod 2). Lisäksi sille voidaan antaa yksikkö ja muita vapaaehtoisia toimintaa ohjaavia tai havainnollistavia määritteitä. Yksikköjä ei kuitenkaan käyttöönottokokeilussa käytetty muissa kuin SolidWorksiin syötettävissä arvoissa virheiden karsimiseksi. Käyttöönottokokeilussa käytettäviä Propertyyn datatyyppejä ovat:

- String, eli merkkijono
- Long, eli kokonaisluku
- Double, eli desimaaliluku
- Boolean, eli totuusarvo.

Propertyyn arvo voidaan linkittää määrittämään toisen Propertyyn arvon mukaan Connection-komponenttia hyödyntämällä. Connectionilla luodaan linkki Part Familysta toiseen syöttämällä Connectioniin polku rakennepuussa oikeaan Part Familyyn, mikä helpottaa tuoterakenteen muokattavuutta ja ylläpidettävyyttä. Connectioneiden avulla Propertyistä pystytään luomaan geneerisiä siten, että samaa muuttujaa ei tarvitse päivittää jokaiseen Part Familyyn erikseen, vaan ne päivittyvät automaattisesti Connectionin kautta linkitetystä Propertyistä. Toisaalta Propertyyn arvo voidaan myös noutaa taulukosta, joka tallennetaan Rules-tietokannasta erillään olevaan Component-tietokantaan.

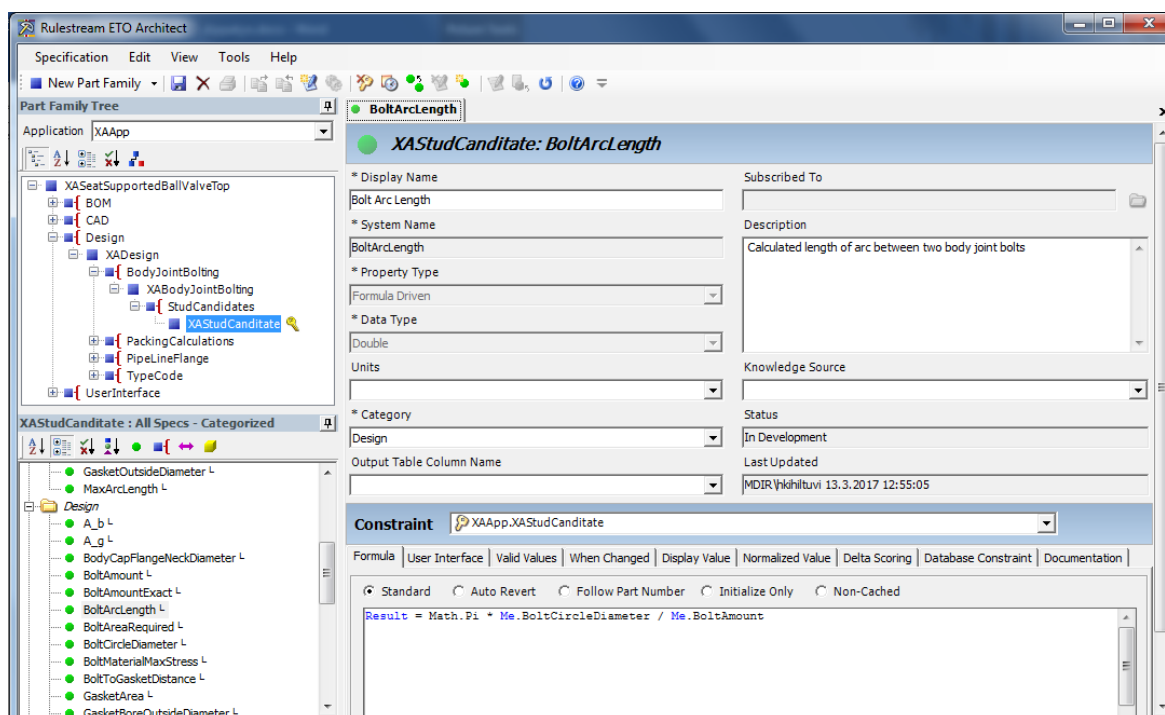
Component-tietokantaan luodaan SQL-tilukkoita engl. *Search Query Language* muuttuvan tai taulukoitavan datan ylläpidon helpottamiseksi. Tuotemallin Propertyyn linkitys tiettyyn taulukkoarvoon toteutetaan Database Constraint -komponentin avulla. Vaihtoehtoisesti taulukosta voidaan muodostaa myös Propertyille lista sallituista arvoista, jolloin Database Constraintia ei tarvita vaan lista voidaan muodostaa suoraan Propertyyn Valid Values List -toiminnon avulla. Käyttöönottokokeilussa Component-tietokantaan luotiin viisi SQL-tilukkoa, joista Kuvassa 29 näkyy osa materiaalitaulukosta. Taulukkojen luontiin, muokkaamiseen ja tallennukseen käytettiin Microsoftin SQL Server Management Studio -ohjelmaa. Taulukoista saatu data tallennettiin käyttöönottokokeilussa Design-haaran Part Familyihin, joissa tehtiin tarvittavat painelaitestandardien mukaiset laskennat ja tarkastelut muun muassa venttiilin jakotason pultituksen, putkilaippapinnan geometrian, akseli-tiivisteen, maksimi- ja minimilämpötilan, suurimman sallitun paine-eron sekä tuoterakenteen yksilöivän tyypikoodin määrittämiseksi.



TCCode	Material	Type	STD	MinTemp	MaxTemp
J2	ASTM A216 gr WCB	CS	ASME CL 300	-30	425
J1	ASTM A216 gr WCC	CS	ASME CL 300	-30	425
J6	ASTM A217 gr C12	CS	ASME CL 300	0	650
J5	ASTM A217 gr C5	CS	ASME CL 300	0	650
J4	ASTM A217 gr WC6	CS	ASME CL 300	0	593
S9	ASTM A351 gr CF3	SS	ASME CL 300	-200	425
S1	ASTM A351 gr CF3M	SS	ASME CL 300	-200	425
S4	ASTM A351 gr CF8	SS	ASME CL 300	-200	815
S8	ASTM A351 gr CF8C	SS	ASME CL 300	-50	815
S6	ASTM A351 gr CF8M	SS	ASME CL 300	-200	815
S7	ASTM A351 gr CF8M	SS	ASME CL 300	-200	815

Kuva 29 Component-tietokannan SQL-materiaalitaulukko

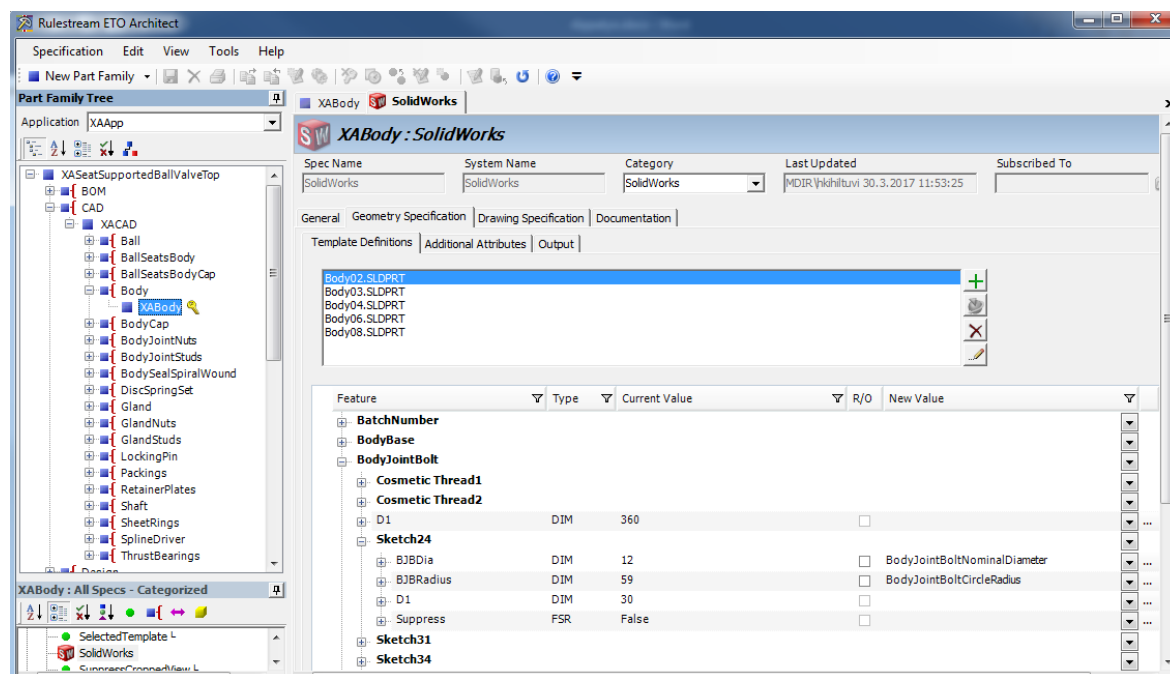
Kuvassa 30 on näkyvillä tuotemallin XAStudCandidate-nimisen Part Familyn Property BoltArcLength. Property on datatyyppiä Double ja se on sijoitettu kategoriaan Design. Kaikille tuotemallin komponenteille voidaan määrittää kategoria, mikä helpottaa komponenttien ryhmittelyä ja oikean komponentin etsimistä. Kategoriat ovat kehitysympäristökohtaisia ja käyttäjä voi luoda ja nimetä niitä vapaasti. Kuvan 30 Propertyssä lasketaan kahden ympyräkehällä olevan pultin keskipisteen välinen kaaren pituus kahden muun samaan Part Familyyn luodun Propertyn perusteella. Kuvan vasemmassa alareunassa näkyy muita Part Familyn Design-kategorian Propertyjä.



Kuva 30 XAStudCandidate - Part Familyn muuttuja eli Property nimeltä BoltArcLength

Rules-tietokannassa tuotemalliin luodaan myös sääntöjen linkitykset 3D-emomalleihin. Jokaiselle eri CAD-ohjelman valmiille integraatiolle on oma komponenttinsa mutta käyttöönottokokeilussa näistä kokeiltiin vain SolidWorks Specificationia (jatkossa SW

Spec). SW Spec on Part Familystä riippuvainen komponentti, jossa määritetään ensin käytettävä emomalli tai -piirustus. Määrittelyn jälkeen mallin tai piirustuksen piirteitä ja ominaisuuksia voidaan sitoa ohjautumaan Part Familyn Propertyjen mukaan. SolidWorksilla luodun 3D-mallin mittoihin sidottavilla Propertyillä tulee olla oikea yksikkö, vaikka niitä ei muualla tuotemallin sisällä käytettäisikään.

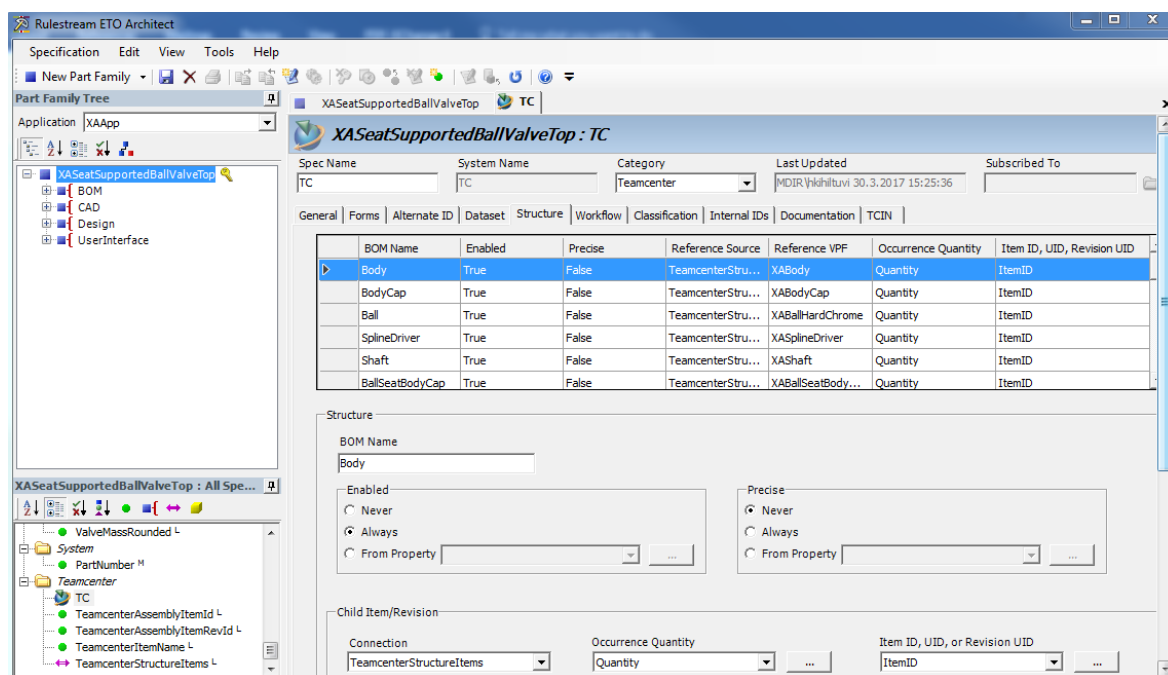


Kuva 31 XABody-Part Familyn SolidWorks Specification

Kuvassa 31 näkyy XABody-nimisen Part Familyn SolidWorks Specification, jossa emomalleiksi on valittu 5 erilaista parametrasta 3D-mallia. Käyttöönottokokeilun toteutuksessa tehtiin ajan säästämiseksi valinta, jossa 3D-mallien parametrisuus rajoitettiin koskemaan ainoastaan koeistettavia ominaisuuksia. Bodyn osalta tämä tarkoitti jakotason pultitukseen liittyvien porausten määrän, koon ja sijainnin sekä putkilaippapinnan koneistukseen liittyvien piirteiden parametrisointia. Näin ollen oli järkevää muokata MFC:lta löytyviä valmiita 3D-malleja parametrisuuden vaatimalla tavalla ja luoda omat emomallit erikseen jokaiselle kokoluokalle. Valinta emomallien välillä tehdään käyttäjän käyttöliittymästä valitseman venttiilikoon mukaisesti. Yksi käyttöönottokokeilun tavoitteista oli luoda täydelliset 3D-kokoonpanot automaattilla luoduista tuotteista. Ajan säästämiseksi toteutuksessa käytettiin mahdollisimman paljon MFC:lta valmiiksi löytyviä 3D-malleja, joihin tehtiin pieniä lisäyksiä ja muokkauksia automaatin virheettömän toiminnan takaamiseksi. Kaikkein yksinkertaisimmille osille luotiin kuitenkin uusi täysin parametrinen emomalli, jota pystyttiin käyttämään kaikille kokoluokille. Kuvassa 31 keskellä näkyy Body-osalle valitut emomallit, alhaalla oikealla emomallin mittoihin linkitetty Propertyt sekä vasemmassa reunassa tuotemallin CAD-haaran kaikki venttiiliin 3D-kokoonpanossa käytettävät osakokonaisuudet.

Nimikkeiden ja niille kuuluvien osalistojen luomista varten Part Familyihin tulee lisätä Teamcenter Specification (jatkossa TC Spec), jolla pystytään määrittämään Teamcenteriin luotavan nimikkeen BOM, attribuuttidata sekä nimikkeelle kuuluvat dokumentit. Tyypillisesti PDM-järjestelmään siirtyvää dataa varten tehdään oma rakennepuu tuotemallin BOM-haaraan, sillä todellinen tuoterakenne usein eroaa 3D-kokoonpanossa esitettävästä

rakenteesta. Käyttöönottokokeilun tapauksessa 3D-kokoonpano ja haluttava tuoterakenne vastaavat toisiaan, joten ajan säästämiseksi rakennepuuta ei kopioitu BOM-haaraan vaan TC Spec lisättiin CAD-haarasta valmiiksi löytyviin Part Familyihin.



Kuva 32 XASeatedSupportedBallValveTop-Part Familyn Teamcenter Specification

Kuvassa 32 esitetään tuotemallin Top-Level Part Familyn TC Spec, jonka Structure-välilehdelle on listattu kaikki mahdolliset tuotteen osalistaan kuuluvat komponentit. Rulestreamissa TC Specejä on kolme erilaista: Teamcenter Item, Teamcenter Search ja Teamcenter Object (Siemens 2017, Mod 19). Käyttöönottokokeilussa näistä hyödynnettiin Teamcenter Item -toimintoa, jolla nimike voidaan luoda, revisioida tai muokata sekä Teamcenter Search -toimintoa, jonka avulla voidaan hakea Teamcenteristä olemassa olevia nimikkeitä ja käyttää niitä hyödyksi tuotemallin rakentamisessa.

Tuotemallin rakenteen ja muiden ominaisuuksien lisäksi Rules-tietokannassa luodaan tuotemallin käyttöliittymä, jolla käyttäjä pystyy määrittämään halutun lopputuloksen ja ajamaan tuotemallia Rulestream Engineer -ohjelman avulla. Käyttöliittymää varten luodaan prosessi, joka koostuu prosessiaskelista. Yksi prosessiaskel voi pitää sisällään esimerkiksi käyttäjältä pyydettäviä syöttöarvoja, laskennan tuloksia tai automaattista 3D-mallinnusta. Prosesseja voidaan luoda vain Top-Level Part Familyihin (Siemens 2017, Mod 3). Käyttöönottokokeilussa käytetään yhtä prosessia, joka koostuu kuudesta prosessiaskeleesta. Prosessiaskelien sisältöä käydään tarkemmin läpi seuraavassa kappaleessa. Rulestreamin kolmatta tietokantaa eli Project-tietokantaa käytettiin käyttöönottokokeilussa vain siltä osin kuin se on välttämätöntä automaatin käytön kannalta. Tietokantaan luotiin uusi projekti, jotta tuotemallin ajaminen on mahdollista, mutta mitään projektiin liittyvää tietoa ei välitetty automaattilla luotaville nimikkeille tai dokumenteille.

4.3 Lopputulos

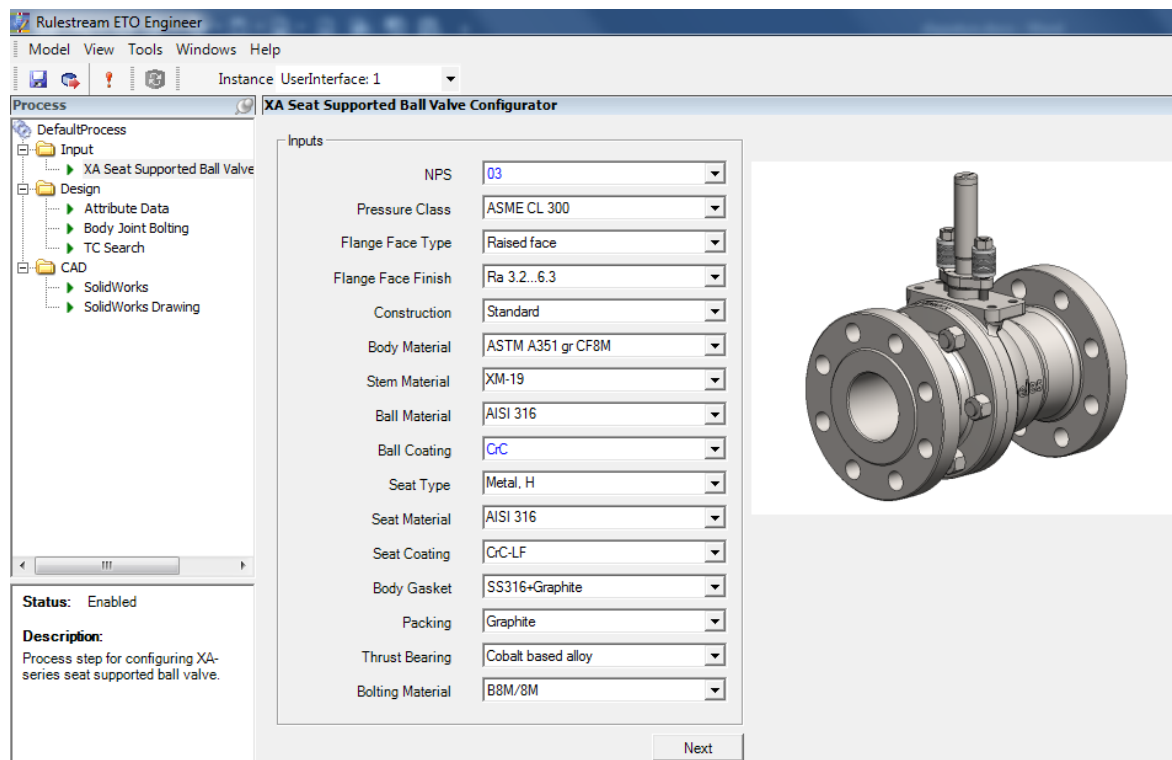
Viiden viikon aikaikkuna käyttöönottokokeilun implementointivaiheelle osoittautui ennako-oletusten mukaisesti hyvin tiukaksi. Tiukasta aikataulusta huolimatta toteutuksessa saatiin osoitettua lähes kaikki halutut toiminnallisuudet, joista tärkeimpinä kokonaisuuksina:

- mahdollisuus luoda venttiilistä suunnittelusäännöstön sisältävä tuotemalli
- laskea tuotemallissa venttiilin jakotason pultituksen mitoitus
- toteuttaa venttiiliin standardin mukainen putkilaipan geometria 3D-malleihin taulukkodatan perusteella
- rakentaa automaattisesti kaikki osat sisältävä 3D-kokoonpano venttiilistä viidessä eri kokoluokassa
- luoda automaattisesti putkilaipan mitoituksen osoittava loppukoneistuspiirustus venttiilin pesälle
- luoda automaattisesti nimikkeet tuotemallin mukaiselle rakenteelle osalistoineen ja attribuuttitietoineen.

Ainoa toiminnallisuus, joka käyttöönottokokeilussa jäi toteuttamatta oli revisioiden luonti jo olemassa oleville nimikkeille ja piirustuksille niitä koskevan muutoksen tapahtuessa. Siitä huolimatta revisioiden luonnin osoitettiin olevan Rulestreamilla mahdollista työtä tehdessä. Osuus kuitenkin jätettiin käyttöönottokokeilun ulkopuolelle siitä syystä, että toimivan logiikan määrittäminen revision tekemiseen uuden nimikkeen tai dokumentin sijaan olisi vaatinut liikaa työtä sovittuun aikaikkunaan nähden. Näin ollen käyttöönottokokeilun tuloksena luodussa suunnitteluautomaatissa lähtökohtana on aina uuden tuotteen luominen sääntöjen asettamien ohjeiden mukaisesti. Automaatin toimintakaavio näkyy liitteessä 3.

Toteutettu suunnitteluautomaatti koostuu kuudesta prosessiaskeleesta, joista ensimmäinen käynnistyy, kun automaatti avataan Rulestream Engineer -ohjelmalla. Ensimmäisessä prosessiaskeleessa käyttäjä pääsee määrittämään millaisen XA-sarjan palloventtiilin hän haluaa rakentaa suunnittelusääntöjen rajoittamilla valintavaihtoehdoilla. Ensimmäisenä käyttäjän tulee valita venttiilin kokoluokka, joka määräytyy virtausaukon koon perusteella. Valinnan vaihtoehtoina ovat 2, 3, 4, 6 ja 8 tuumaa. Alasvetovalikon oikealla puolella oleva kuva demonstroi valinnan mukaista venttiilin ulkonäköä ja vaihtuu valitun kokoluokan mukaiseksi. Seuraavassa valintakohdassa käyttäjä valitsee venttiilin paineluokan, jonka vaihtoehtoina ovat painelaitestandardit ASME class 300 ja EN PN 40. Paineluokan valinta vaikuttaa esimerkiksi sallittuihin putkilaippapintoihin, mikä valitaan käyttöliittymässä kolmantena. Sallitut putkilaippapinnat valittuun paineluokkaan saadaan Component-tietokantaan luodusta taulukosta. Automaatti pystyy toteuttamaan yhteensä 11 erilaista laippapintaa, jotka konfiguroidaan parametriseen 3D-omomalliin neljää leikkauspiirrettä käyttäen. Piirteiden mitoitus saadaan laippapintataulukosta, johon tiedot on kopioitu suoraan painelaitestandardeista. Tapauksessa, jossa painelaitestandardia muokataan laippapintojen mitoitus osalta, automaatin päivittämiseen riittää, että taulukon mitta-arvot korjataan muutoksen mukaiseksi. Putkilaippapinnan geometrian muutoksia havainnollistetaan automaatin ajon myöhemmässä vaiheessa luotavassa koneistuspiirustuksessa. Kaiken kaikkiaan käyttöliittymä pyytää valintaa Kuvassa 33 näkyvään 16 kohtaan, joilla halutun venttiilin geometria ja rakenne pystytään määrittämään. Edellä mainittujen kokoluokan (NPS, *engl Nominal Pipe Size*), paineluokan (Pressure Class) ja putkilaippapinnan (Flange Face Type) lisäksi käyttöliittymässä valitaan putkilaippapinnan viimeistely (Flange Face Finish), konstruktio (Construction), pesämateriaali (Body Material), akselimateriaali (Stem Material), virtausaukon sulkuelimen eli pallon materiaali (Ball Material), pallon pinnoite (Ball Coating), sulkuelimen tiivisteen tyyppi (Seat Type), tiivisteen materiaali (Seat Material), tiivisteen pinnoite (Seat Coating), pesän jakotason tiiviste (Body Gasket), akselitiiviste (Packing), laakerointi (Thrust Bearing) sekä pulttien materiaali (Bolting Material). Näistä valinnoista saadaan yhteensä lähes 900 000 erilaista lopputulosta.

Tuotemalliin on kuitenkin suunnittelusääntöjen mukaisesti lisätty sääntöjä, jotka rajaavat sallittuja vaihtoehtoja, sillä esimerkiksi kaikki liukuparit pallon pinnoitteen ja sen kanssa jatkuvassa kontaktissa olevan tiivistein pinnoitteen eivät ole sallittuja liian suuren kitkan vuoksi. Näin ollen automaatilla luotavia sallittuja konfiguraatioita on huomattavasti vähemmän noin 80 000 kappaletta. Jos käyttäjä tekee käyttöliittymässä tuotemallin sääntöjen vastaisen valinnan, automaatti korjaa itse muut valinnat säännöt täyttäväksi.



Kuva 33 Käyttöönottokokeilussa toteutetun suunnitteluautomaatin käyttöliittymä Rulestream Engineer -ohjelmassa

Kuvassa 33 näkyy käyttöönottokokeilussa toteutetun suunnitteluautomaatin loppukäyttäjän käyttöliittymä Rulestream Engineer -ohjelmassa. Käyttöliittymän valinnat muuttuvat sinisiksi siinä tapauksessa, jos käyttäjä on muokannut oletusarvoja. Kuvan vasemmassa laidassa näkyvät automaatin prosessiaskeleet kategorioitain. Askeleesta toiseen voidaan siirtyä joko käyttöliittymään tehdyillä Next- ja Prev-näppäimillä tai valitsemalla haluttu askel prosessi-ikkunasta.

Suunnitteluautomaatin toisessa prosessiaskeleessa automaatti palauttaa käyttäjälle käyttöliittymävalintojen perusteella suunniteltavan venttiilin attribuuttitietoja. Käyttöönottokokeilussa attribuutteina haluttiin määrittää venttiilin rakenteen yksilöivä tyyppikoodi, suurin sallittu paine-ero venttiilin yli sekä venttiilin suurin ja pienin sallittu käyttölämpötila. Automaatin palauttamat attribuuttiarvot näkyvät Kuvassa 34.

Attribute Data

Attributes

Valve Type Code: XA03DWGAS6RXHBDD

Max Differential Pressure: 49,6

Max Temperature: 600

Min Temperature: -50

Prev Next

Kuva 34 Automaatin palauttavat attribuuttiarvot

Venttiilin tyyppikoodi koostuu 11 tyyppikoodimerkin muodostamasta merkkijonosta. Tyyppikoodimerkit ovat 1 tai 2 merkkiä pitkiä ja ne haetaan Component-tietokannan taulukoista tuotemallin käyttöön. Samalla taulukoista poimitaan myös maksimi- ja minimikäyttölämpötilat kullekin komponentille sekä konstruktiolle. Arvoja verrataan toisiinsa ja maksimiarvoista palautetaan pienin lämpötilan ylärajaksi sekä minimiarvoista suurin alarajaksi. Lisäksi painetta pitäville komponenteille sekä konstruktiolle määritetään suurin sallittu paine-ero venttiilin yli. Arvoista pienin on koko venttiilille suurin sallittu paine-ero bareina.

Seuraavassa prosessiaskeleessa esitetään venttiilin pesän jakotason pultituksen laskennan tulokset. Laskenta perustuu ASME-painelaitestandardin asettamiin vaatimuksiin sekä MFC:n sisäisiin standardeihin ja se suoritetaan käyttöliittymässä tehdyn venttiilin kokoluokan mukaan. Sisäisten standardien osalta on asetettu vaatimukseksi tietty keskimääräinen pintapaine jakotason tiivisterenkaalle. Jokaiselle pulttikoolle on myös määritetty oma maksimi etäisyys kahden pultin välillä, minkä alittuessa laippa voidaan olettaa riittävän jäykäksi tiiveyden varmistamiseksi. Lisäksi laskennassa tarkistetaan, että mutterit eivät ole liian lähellä toisiaan tai venttiilin seinämiä, minkä ansiosta venttiili on kokoonpantavissa standardityökaluja hyödyntäen. Automaatti palauttaa laskennan tulokset käyttäjälle konfiguroinnin aikana (Kuva 35).

Body Joint Bolting

Calculation results

Bolt Nominal Size	Bolt Amount Exact	Bolt Amount	ASME Bolted Body Joint	Check Bolt Arc Length	Check Min Arc Length	Check Neck Arc Length	Cal Pas
M10x1.5	16,17784054678...	18	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
M12x1.75	11,09593496243...	12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
M14x2.0	8,080491202274...	10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
M16x2.0	5,870549110752...	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M18x2.5	4,830662965452...	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M20x2.5	3,75692950768...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M22x2.5	3,005121241562...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M24x3.0	2,609132938112...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M27x3.0	1,9809842526471...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M30x3.5	1,630166115453...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M33x3.5	1,307240538078...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M36x4.0	1,114231967735...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
M39x4.0	0,926766722451...	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Prev Next

Kuva 35 Automaatin suorittaman venttiilin pesän jakotason pultituksen laskennan tulokset

Suunnitteluautomaatin palauttamista vaihtoehtoista on merkitty kirkkaan vihreällä se pultitus, jonka automaatti on valinnut parhaaksi vaihtoehdoksi. Muut vaatimukset läpäisevät mutta valitsematta jääneet vaihtoehdot on merkitty toisella vihreän sävyllä (Kuva 35). Esimerkkitapauksessa automaatti on laskenut optimaaliseksi vaihtoehdoksi 6 kappaletta M16-pultteja. Valinta suoritetaan vaatimukset läpäisevistä vaihtoehtoista sen mukaan millä pulttikoon ja -lukumäärän kombinaatiolla päästään lähimmäksi laskennallista tarkkaa arvoa. Esimerkkitapauksessa laskennallinen lukumäärä riittävän pintapaineen saavuttamiseksi olisi M16-pultilla noin 5,87. Automaatin valitsema lukumäärä 6 on hyvin lähellä laskennallista arvoa ja näin ollen säästytään ylivoimittamisen aiheuttamilta kustannuksilta venttiilin valmistuksessa. Pulttien määrän tulee MFC:n suunnittelusääntöjen mukaisesti olla aina parillinen.

Automaatin neljännessä prosessiaskeleessa tehdään haku olemassa olevista nimikkeistä Teamcenteriin. Haun toimivuus on välttämätöntä, sillä PDM-järjestelmään ei haluta luoda uutta nimikettä, jos vastaava nimike löytyy järjestelmästä valmiina. Nimikehaku toteutettiin käyttöönottokokeilussa kahdelle erityyppiselle osalle. Ensin haku tehdään tuotekohtaiselle Body-osalle eli pesän runkopuolikkaalle. Jokaiselle luodulle Body-nimikkeelle liitetään attribuuttitietona sen yksilöivä osuus venttiilin tyyppikoodista. Tyyppikoodin kuudella ensimmäisellä tyyppikoodimerkillä tarkalleen yksilöidä millaisesta Body-osasta on kyse, sillä merkit määrittävät venttiilin tyypin, koon, paineluokan, laippapinnan, konstruktion sekä pesän materiaalin. Toisessa haussa etsitään PDM-järjestelmästä akselin tiivisteiden kiristysbolkin vaarnaruuveja. Vaarnaruuvit ovat standardiosia, jotka on luotu PDM-järjestelmään ennakkoon. Tuotemalli määrittää tarvittavan ruuvien pituuden ja nimelliskoon, joiden mukaan Teamcenteristä löydetään oikeat ruuvit. Automaatin suorittaman nimikehaun tulokset ovat näkyvillä Kuvassa 36.

TC Search

TC Search Results

Body

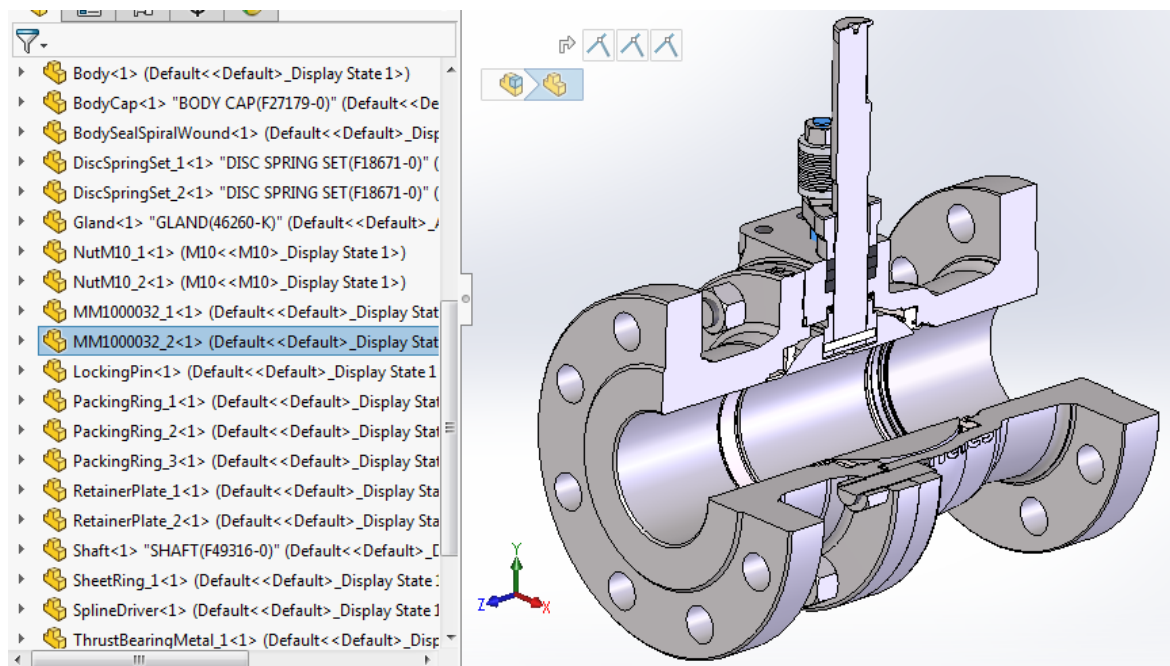
Item ID	Item Revision ID	Retrieved SW Part File

Gland Stud

Item ID	Item Revision ID	CheckedOutFilename
MM1000032	0	
MM1000032	0	

Kuva 36 Teamcenteriin tehdyn nimikehaun tulokset

Automaatin palauttamista haun tuloksista nähdään, että esimerkkitapauksen valinnoilla ei löydetty Teamcenteristä sopivaa Body-osaa, mutta akselintiivisteiden kiristysbolkin ruuvit löytyivät (Kuva 36). Kyseisessä venttiilissä niitä tarvitaan kaksi kappaletta, joten haun tuloksena tuotiin rakenteelle oikea määrä nimikkeitä. Seuraavassa prosessiaskeleessa luodaan SolidWorksilla käyttöliittymässä tehtyjen valintojen mukainen 3D-kokoonpano venttiilistä, joka on esitetty Kuvassa 37. Kokoonpanossa hyödynnetään haussa löytyneiden nimikkeiden 3D-malleja.



Kuva 37 Automaatilla luodun venttiilin 3D-kokoonpanon osaleikkaus SolidWorksissä

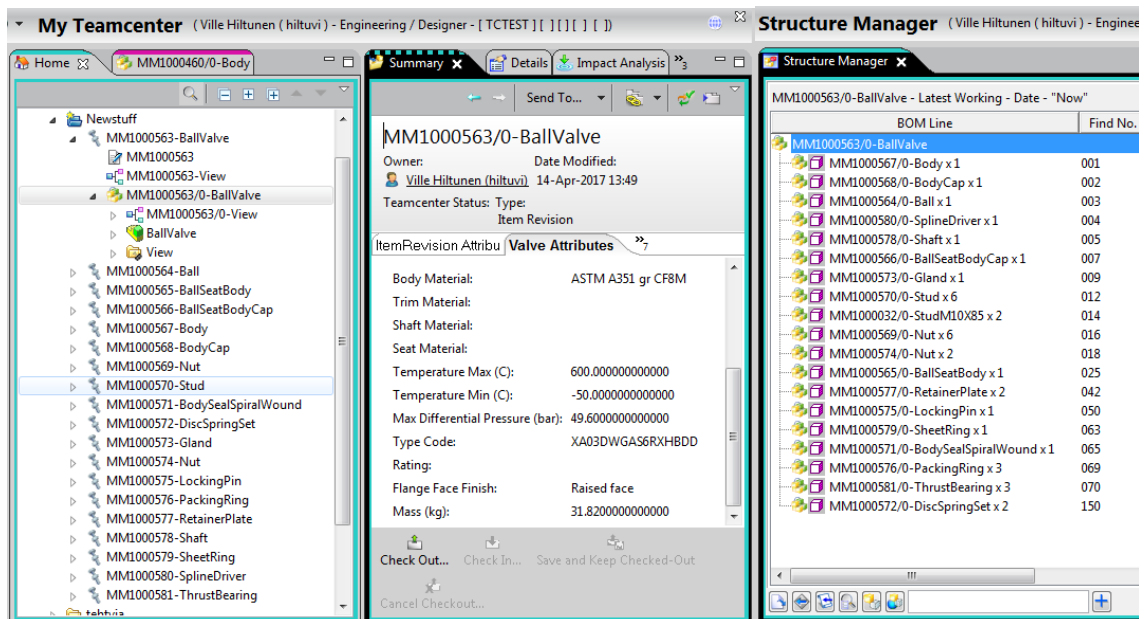
Automaatin luoma 3D-kokoonpano on lähes täydellinen malli suunniteltavasta venttiilistä, vaikka mallinnuksessa jouduttiinkin tekemään pieniä kompromisseja ajan säästämiseksi. 3D-mallit tuodaan kokoonpanoon ensisijaisesti niiden tuotemalliin määrätyillä oletusnimillä. Lisäksi niihin osiin, joita rakenteella on yhtä useampia, lisätään perään alaviiva ja järjestysnumero. Kuitenkin niille osille, joille Teamcenteristä löydetään valmiit nimikkeet, oletusnimi korvataan Teamcenteristä haetulla nimikkeen tunnisteella eli ID:llä *engl. identifier*. Kuvassa 37 Teamcenteristä haettu ruuvi näkyy sinisellä korostettuna komponenttilistassa ja kokoonpanossa. Kokoonpano haluttiin rakentaa siten, että minkä tahansa osan tulee olla poistettavissa tai vaihdettavissa ilman vaikutuksia kokoonpanon muihin osiin. Käytössä olevassa SolidWorks-versiossa ei ole mahdollisuutta hyödyntää skeleton-mallinnustekniikkaa samalla tavoin kuin esimerkiksi PTC Creo -CAD-ohjelmistossa, mikä olisi helppo tapa kokoonpanon ohjaamiseen. Skeleton-tekniikkaa sovellettiin kuitenkin kokoonpanon toteutuksessa siten, että tyhjiin kokoonpanopohjaan lisättiin apupiirustuksia, -akseleita, -tasoja ja pisteitä osien sijainnin määrittämiseksi. Näin ollen 3D-mallien sijainti on toisista osista riippumatonta ja ne ovat sidottu ainoastaan kokoonpanopohjasta löytyviin geometrioihin. Kokoonpanoon tuodaan oikeat 3D-mallit riippuen käyttäjän tekemistä valinnoista. Käyttöliittymästä voidaan valita esimerkiksi pallon tiivisteiden tyyppi, joka määrää tuotemalliin mitä osia kyseisen konstruktion kokoonpanossa tulee käyttää. Joihinkin 3D-malleihin on lisätty parametriseja piirteitä siten, että esimerkiksi jakotason ruuvitus saadaan visualisoitua juuri sen mukaisesti, kuin se tuotemallin laskennan mukaan halutaan toteuttaa. Lisäksi Body-osan putkilaipan geometria mukautuu 3D-malliin käyttäjän valinnan mukaiseksi. Putkilaipan geometria mukautuu emomallin neljän parametriseja pääpiirteiden näkyvyyttä ja mitoitusta ohjaamalla. Tiedot oikeaan geometriaan automaatti hakee tuotemallin Components-tietokannan taulukosta käyttäjän tekemän valinnan mukaisesti. Näin ollen automaatilla saadaan luotua 11 geometrialtaan erilaista standardien määräämää putkilaippakoneistusta ja mahdolliset muokkaukset tai lisäykset standardeihin olisi helppo päivittää Components-tietokannan taulukkoon.

Putkilaipan geometrian tarkastelua varten automaattiin lisättiin 6. prosessiaskel, jossa Body-osasta tehdään automaattisesti loppukoneistuspiirustus. Käyttöönottokokeilussa päätettiin priorisoida tuotemallin rakennusta ja 3D-automaatiota, joten piirustusautomaation osalta päätettiin keskittyä vain perusominaisuuksien koeistamiseen. Siemens PLM Software on kehittänyt SolidWorksillä toteutettavaa piirustusautomaatiota varten Drawing Productivity Pack -lisäominaisuuden. Drawing Productivity Packillä voidaan ohjata esimerkiksi mittojen, merkintöjen ja kuvantojen sijaintia ja näkyvyyttä piirustuksessa. Mittojen lisäksi myös merkinnät, kuten pinnankarheudet, huomautukset ja toleranssit voidaan lisäosan avulla sitoa tuotemallin Propertyihin, mikä helpottaa piirustusten ylläpidettävyyttä huomattavasti. Automaattia varten luodussa emopiirustuksessa muokataan sopivan loppukoneistuspiirustuksen tuottamiseksi automaattisesti seuraavia ominaisuuksia:

- kuvantojen lisääminen ja poistaminen
- osaleikkauksen tekeminen
- yksityiskohtaisen kuvannon lisääminen ja poistaminen
- mittojen lisääminen, poistaminen ja muokkaaminen
- mittatoleranssien muokkaaminen
- geometrysten toleranssien lisääminen, poistaminen ja muokkaaminen
- huomautusten ja tekstien lisääminen, poistaminen ja muokkaaminen
- pinnanlaatumerkintöjen lisääminen, poistaminen ja muokkaaminen
- mittojen, toleranssien ja merkintöjen sijainnin muokkaaminen
- apupiirustusten näkyvyyden hallinta.

Esimerkki samasta emopiirustuksesta tuotettujen piirustusten eroista näkyy liitteessä 4. Liitteen 4 ensimmäisessä kuvassa on 2-tuumaisen venttiilin Body-osan loppukoneistuspiirustus ASME-standardin mukaisella ”raised face”-laippapinnalla ja liitteen toisessa kuvassa saman osan piirustus ”small groove”-laippapinnalla. Piirustuksista nähdään, että laippapinnan korokkeen geometria määräytyy tuotemallin sääntöjen mukaiseksi. Lisäksi silloin, kun laippaan kuuluu urakoneistus, siitä tehdään yksityiskohtainen kuvanto ja esimerkiksi pinnanlaatumerkintä siirretään uuteen kuvantoon ja tarvittavat lisämerkinnät sekä mitat lisätään piirustukseen. Osapiirustusten lisäksi käyttöönottokokeilussa opeteltiin luomaan Rulestreamin avulla kokoonpanopiirustuksia ja piilottamaan kokoonpanoon kuulumattomat osat pois näkyvistä.

Piirustuksen luomisen jälkeen automaatti on käynyt läpi kaikki prosessiaskleet ja seuraavana vaiheena on vapauttaa luotu konstruktio Teamcenteriin tuotenimikkeiden luontia varten. Uudet nimikkeet syntyvät venttiilikokoonpanolle sekä kaikille niille osille, joille automaatin tekemä haku ei löytänyt olemassa olevaa nimikettä. Jokainen nimike saa tunnistenumeron sekä nimen, joka luodaan tuotemallin TC Specin määrittelyn mukaisesti. Nimikkeelle lisätään sille SolidWorksissä luotu 3D-malli tai kokoonpano ja mahdollinen piirustus. Lisäksi venttiilikokoonpanon nimikkeen attribuuttiarvoiksi annetaan tuotemallin määrittämät tyyppikoodi, suurin sallittu paine-ero, minimi- ja maksimilämpötila, käyttäjän valitsema pesämateriaali ja putkilappapinta sekä SolidWorksin laskema venttiilin massa. Kuvan 38 vasemmassa laidassa näkyvät esimerkkitapauksessa luodut nimikkeet ja keskellä venttiilininimikkeelle viedyt attribuuttiarvot.



Kuva 38 Luodut Teamcenter-nimikkeet sekä venttiilininimikkeen attribuuttitiedot ja osalista

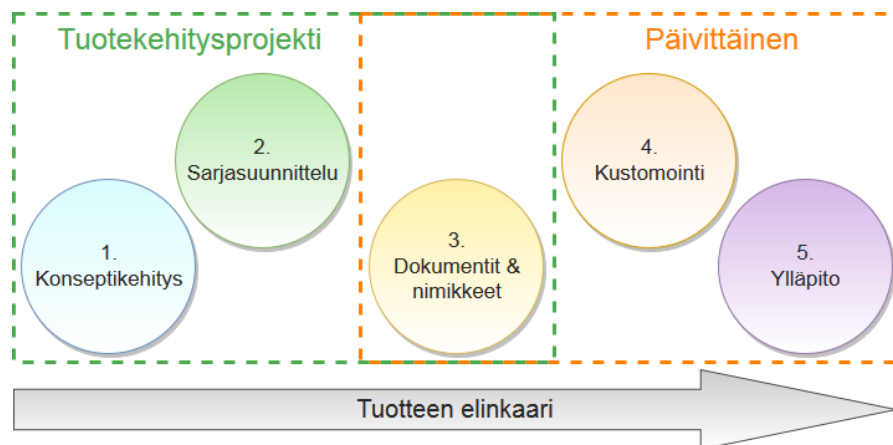
Lisäksi venttiilininimikkeelle lisätään tuotemallin mukainen osalista uusista ja haun löytämistä nimikkeistä. Osalistassa näkyy tarvittavat nimikkeet lukumäärineen sekä MFC:n suunnittelusääntöjen mukaiset osanumerot. Kuvan 38 oikeassa laidassa näkyvän esimerkkitapauksen venttiilininimikkeen osalistasta nähdään, että automaatin Teamcenter-haulla löytyneet akselitiivisteiden kiristysholkin ruuvit (nimike MM1000032) ja kaikki uudet nimikkeet on lisätty osalistaan oikein. Näin ollen automaattilla on saatu suunniteltua käyttäjän valintojen mukainen venttiili ja tuotettua siitä 3D-mallit ja -kokoonpano, koneistuspiirustus sekä nimikkeet osalistoihin ja attribuuttitietoihin.

5 Tulokset ja johtopäätökset

Tässä kappaleessa käsitellään työn kokeellisessa osiossa toteutetun ohjelman kaltaisella suunnitteluautomaatilla saavutettavia hyötyjä MFC:lla, jos automaatti otettaisiin globaaliin käyttöön kaikilla MFC:n suunnittelutoimipisteillä. Tarkastelussa tulee ottaa huomioon, että käyttöönottokokeilussa toteutettu automaatti on tehty ainoastaan todistamaan Rulestream-ohjelman toiminnallisuuksia, eikä sitä sellaisenaan vielä pystytä hyödyntämään kilpailukyyn kehittämiseen. Näin ollen kappaleessa esitetään myös kirjoittajan suosittelemia jatkotoimenpiteitä suunnitteluautomaatin kehittämiseen ja käyttöönottoon. Käyttöönottokokeilussa toteutetun automaatin toimintaa demonstroitiin useille kymmenille aihealueeseen liittyville MFC:n ammattilaisille kahdeksassa esityksessä, joissa reaktiot olivat pääosin positiivisia ja aihe herätti paljon keskustelua. Lisäksi järjestettiin suuri määrä epämuodollisempia tapaamisia, joissa käytiin keskusteluja jatkomahdollisuuksista sekä kehityspotentiaalista. Tämä luku pohjautuu osittain keskusteluissa ilmi nousseisiin asioihin.

5.1 Suunnitteluautomaatin tuottama hyöty yrityksessä

MFC:lla pyritään kehittämään toimintaa leanin oppien mukaan ja suunnitteluautomaatit voisivat olla merkittävässä roolissa niiden tuomisessa myös yrityksen suunnittelutehtäviin. Kappaleessa 2.4 esiteltiin leanin mukaisia suunnitteluautomaattien yleisiä hyötyjä, jotka ovat tehokkuuden, standardoinnin, työntekijöiden motivaation sekä laadun kasvu. Käyttöönottokokeilussa toteutetun suunnitteluautomaatin toiminnallisuudet voidaan MFC:n tapauksessa jakaa viiteen eri osioon, joita ovat konseptikehitys, sarjasuunnittelu, valmistusdokumenttien ja tuotenimikkeiden luonti, kustomointi sekä ylläpito (Kuva 39). Jokaisella osa-alueella hyödyt näkyvät omalla tavallaan tehtävisidonnaisesti. Osiot samassa järjestyksessä kuvaavat myös tuotteen elinkaarta suunnittelutehtävien osalta (Kuva 39).



Kuva 39 Suunnitteluautomaatin toiminnallisuudet tuotteen elinkaaren eri vaiheissa

Tarkoituksena on, että jatkossa MFC:n tuotekehitysprojektien yhteydessä luotaisiin tuotemalli suunnitteluautomaattiin, jolla saadaan hyötyjä projektin konseptikehityksessä ja sarjasuunnittelussa sekä niihin liittyvässä dokumenttien ja nimikkeiden luonnissa. Suunnitteluautomaatin avulla saadaan vähennettyä tuotekehitysprojektiin kuluvaan aikaan ideointivaiheesta valmiiksi tuotteeksi. Jo MFC:n aikaisemmassa suunnitteluautomaatin kokeilussa kyseinen aika onnistuttiin kutakuinkin puolittamaan, vaikka suunnitteluautomaatti ei luonut nimikkeitä, eikä tuotettujen piirrustusten ja mallien ylläpito ollut mahdollista automaatin avulla. Kun suunnitteluautomaattiin sisällytetään myös automaattinen nimikkeiden luonti sekä tuotetiedon ylläpito, tuotekehitysprojektiin kuluva

aika voi olla jopa 80% pienempi kuin täysin manuaalisesti toteutetussa projektissa. Kerran muutamassa vuodessa toistuvien tuotekehitysprojektien lisäksi hyötyjä voidaan odottaa saavutettavan myös päivittäisessä suunnittelutyössä, johon kuuluvat tuotteiden tilauskohtainen kustomointi ja ylläpito sekä niihin liittyvien dokumenttien ja nimikkeiden luonti (Kuva 39).

Käyttöönottokokeilun toteutuksessa keskityttiin todistamaan hyötyjä pääasiassa sarjasuunnittelun sekä valmistusdokumenttien ja tuotenimikkeiden luonnin tehtävissä. Kuitenkin hyödyt on nähtävissä jokaisella osa-alueella työn tuloksena luodussa suunnitteluautomaatissa. Konseptikehityksen osalta suurimmat hyödyt saavutetaan tuotteen laadun ja työn tehokkuuden kehittämisessä. Käyttöönottokokeilussa luodussa automaatissa demonstroitiin, kuinka venttiilin pesän jakotason ruuvituksen laskenta saadaan sisällytettyä tuotemalliin, minkä ansiosta laskenta voidaan suorittaa sekunnin kymmenyksissä kaikille mahdollisille ruuvivaihtoehdoille optimaalisen tuloksen löytämiseksi. Esimerkinomaisella laskennalla, iteroinnilla ja optimoinnilla eli MDO-työkalujen hyödyntämisellä pystytään poistamaan tuotteesta esimerkiksi ylimääräisiä varmuusvaroja, mikä useimmissa tapauksissa laskee tuotteen valmistuskuluja. Vastaava iterointi manuaalisin suunnittelumenetelmin ei ole mahdollista, sillä laskennan toistaminen lukuisia kertoja veisi kohtuuttoman paljon aikaa. Siksi saatetaan päätyä valitsemaan muutama sopivimmaksi oletettu vaihtoehto, suoritetaan laskennat ja valitaan oletetuista vaihtoehtoista paras. Näissä tapauksissa on hyvin mahdollista, että suunnittelija ei ole valinnut vertailuun optimaalista vaihtoehtoa, jolloin tuotteen laatu kärsii ja kilpailukyky ei ole maksimaalinen. Lisäksi automaatilla suunnitellusta tuotteesta saadaan nopeasti 3D-kokoonpano, jossa tuotteen laatua voidaan tarkastella visuaalisesti. Kokoonpanolle voidaan tämän jälkeen suorittaa joko manuaalisesti tai automaattisesti muita tuotteen laatuun liittyviä kokeita, kuten FEM-laskentaa CAE-ohjelmalla tai koneistusratojen tarkasteluja yksittäisille osille CAM-ohjelmalla. Laadun lisäksi suunnitteluautomaatilla voidaan kasvattaa konseptikehityksen tehokkuutta, sillä venttiilien suunnittelu perustuu aina samoihin painelaitestandardien asettamiin lainalaisuuksiin. Kun tuotemalli on kerran luotu ja dokumentoitu hyvin, sitä voidaan jatkossa käyttää pohjana muiden uusien venttiilien kehittämisessä. Lisäksi yleisesti useissa eri tuotesarjoissa toistuvat venttiilisuunnittelun säännöt voidaan luoda geneeriseen tuotemalliin, josta tiedot kopioituvat yksittäisiin tuotesarjoihin. Tämä nopeuttaa tuotekehitystyötä entisestään, kun tiedot on helpommin saatavilla ja uudelleenkäytettävissä.

Luvussa 3.3.1 on esitetty MFC:n tämänhetkisten suunnittelutehtävien jako, jossa tuotteistamisvaihe pitää sisällään sekä sarjasuunnittelun että valmistusdokumenttien ja tuotenimikkeiden luonnin perustuotteille. Jako on kuitenkin huono kuvaamaan suunnitteluautomaatin toiminnallisuuksia, sillä automaatti toteuttaa saman toimintaprosessin dokumenttien ja nimikkeiden luomiselle huolimatta siitä millaisesta suunnittelutehtävästä on kyse. Suunnitteluautomaattia käytettäessä sarjasuunnittelussa insinöörien tehtäväksi jää kerätä tuotemalliin perustellut säännöt niille tuotevaihtoehdoille, jotka kuuluvat tuotemallin sallittuihin konfiguraatioihin sekä luoda tarvittavat emomallit ja -piirustukset valmistusdokumenttien automaattisen tuottamisen mahdollistamiseksi. Suunnittelu-perusteiden pohdinta ja määrittely sekä parametrinen mallinnus voidaan keskimäärin olettaa suunnittelijalle mielekkäämmäksi ja motivoivammaksi työksi kuin itseään toistavien valmistuspiirustusten sarjamainen luonti. Käyttöönottokokeilun automaatilla yhden venttiilin konfigurointi kestää noin 7 minuuttia MFC:lla yleisesti käytettävillä kannettavilla tietokoneilla. Konfiguroinnin tuloksena saadaan 3D-kokoonpanon ja -mallien lisäksi 1 piirustus ja noin 20 kappaletta nimikkeitä. Liitteessä 5 on osoitettu, kuinka MFC:n

tyypilliseen yksittäiseen kustomointitehtävään käytettävää aikaa pystytään lyhentämään 4 tunnista 33 minuuttiin eli noin 86%. Liitteen 5 tapauksessa konfigurointiin käytettävään aika on arvoitu 8 minuuttiin siitä syystä, että todellisessa käytössä kyseissä esimerkkitapauksessa tulisi konfiguroida kaksi piirrustusta yhden sijaan. Yksittäisen valmistuspiirrustuksen konfigurointi vie hieman yli 30 sekuntia. Esitetyn aikahyödyn saavuttaminen todellisuudessa vaatii kuitenkin vielä suunnitteluautomaatin jatkokehittämistä, sillä tuotettavat piirrustukset ovat puuttellisia ja esimerkiksi jakotason pultituksen optimointi ei vastaa todellisia MFC:n suunnittelusääntöjä. Liitteessä 5 esitetty tehtävä on nykyisin MFC:lla kustomoinnin vastuulla mutta suunnitteluautomaattia käytettäessä se olisi sarjasuunnittelun tehtävä, sillä lopputulos on tuotemallin suunnittelusääntöjen mukaan konfiguroitavissa. Kustomoinnin tehtäviksi nähdään suunnitteluautomaattia käytettäessä kuuluvan sellainen suunnittelutyö, jossa joudutaan lisäämään perustuotteeseen tuotemallissa toimivaksi todentamattomia ominaisuuksia ja tarkastelemaan erilaisia toteutusmahdollisuuksia kustomoidun tuotteen valmistamiseksi.

Käyttöönottokokeilussa luodun automaatin nykyisen toiminnan avulla saadaan 3D-mallit kaikista osista, joista pystyttäisiin tuottamaan valmistuspiirrustukset automaattisesti, jos osille lisättäisiin emopiirrustukset tuotemalliin. Jos automaatile luodaan mahdollisuus sarja-ajoihin, joissa pystytään konfiguroimaan kerralla useita tuotteita ennalta määritetyillä käyttöliittymän syöttöarvoilla, automaatti voidaan jättää tuottamaan konfiguraatioita esimerkiksi yön ajaksi ilman suunnittelijan aktiivista valvontaa. Tällä olisi merkittävä sarjasuunnittelua tehostava vaikutus. Työn puitteissa arvioitiin, että globaalisti MFC:lla käytetään venttiilejä koskevien piirrustusten ja nimikkeiden luontiin vuosittain noin 20000 tuntia suunnittelijoiden työaikaa. Käytetystä ajasta noin 20% arvioidaan käytettävän sellaisten harvoin toistuvien tuotteiden piirrustusten ja nimikkeiden luontiin, joita ei olisi järkevää sisällyttää suunnitteluautomaattiin. Liitteessä 5 esitetty 86% aikasäästö yksittäisessä työtehtävässä oletetaan hieman keskiarvoa suuremmaksi, joten keskimäärin automatisoiduissa työtehtävissä oletetaan säästettävän noin 80% manuaaliseen suunnitteluun käytetystä ajasta. Näin ollen suunnitteluautomaattien globaalilla hyödyntämisellä kaikkien venttiilisarjojen suunnittelussa määrä pystyttäisiin pudottamaan noin 7200 tuntiin, johon sisältyy automaatin ulkopuolelle jäävien tilauskohtaisten kustomointien teko päivittäistyössä suunnittelu-automaatilla tuotettujen perustuotteiden pohjalta. On kuitenkin huomioitava, että kyseinen aika ei sisällä suunnitteluautomaatin luomiseen kuluvaa aikaa. Toisaalta automaatti oletetaan kehitettävän uuden tuotteen kehitysprojektissa, joten päivittäistyössä saavutettavaa hyöty voidaan arvioida todelliseksi. Vapautunut työ määrä voitaisiin siirtää enemmän arvoa tuottaviin suunnittelutehtäviin ja suunnitteluautomaatin jatkokehitykseen itseään toistavien työtehtävien sijaan.

Sarjasuunnittelun sekä dokumenttien ja nimikkeiden luonnin työvaiheiden tehostamisen lisäksi tuotetut dokumentit ja nimikkeet ovat aina tuotemalliin määritettyjen sääntöjen mukaisesti tehtyjä. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi nimeämiset ovat aina sisäisten standardien mukaisia ja tulokset ovat tasalaatuisia, mikä standardoi tuotetietoa. Lisäksi automaatin tuottamat 3D-mallit luodaan hyviä mallinnuskäytäntöjä noudattaen, minkä ansiosta ne ovat aina helposti muokattavissa ja uudelleenkäytettävissä suunnittelussa. Standardoinnin avulla pystytään poistamaan esimerkiksi epä johdonmukaisesta nimeämisistä ja inhimillisistä virheistä koituvaa hukkaa. Epä johdonmukainen tuotenimikkeiden nimeäminen aiheuttaa keskenään samanlaisia nimikkeitä eli duplikaatteja, kun olemassa olevaa tuotetta ei löydetä järjestelmästä. Inhimilliset virheet suunnittelussa taas lisäävät mahdollisuutta tilauksen myöhästymiselle asiakkaalle luvatusa toimituspäivästä ja siitä

aiheutuvia sakkoja. Lisäksi tuote joudutaan suunnittelemaan ainakin virheiden osalta uudestaan.

Tuotteiden kustomoinnin osalta on tärkeää määrittää jako automaattilla luotavien perustuotteiden ja niistä muunneltavien erikoistuotteiden välille. Esimerkiksi muutaman kerran vuodessa toistuvaa erikoistuetta ei ole järkevää lisätä automaattiin, sillä pahimmassa tapauksessa tuotemalliin luomiseen ja ylläpitämiseen kuluva aika on suurempi kuin perinteisin suunnittelumenetelmin tuotteen suunnitteluun käytetty aika. Suurin hyöty kustomoinnissa saavutetaan siitä, että suunnittelijoilla on automaatin avulla aina käytössään viimeisimpien tuotepäivitysten mukainen perustuote, jolle tarvittavat muokkaukset voidaan tehdä manuaalisesti. Perustuotteen ajantasaisuus varmistetaan ylläpidon toimesta. Automaatin tuotemallia tulisi päivittää heti, kun päätös tuotemuutoksesta on tehty. Käyttöönottokokeilussa luotuun automaattiin ei ehditty ajanpuutteen vuoksi toteuttaa nimikkeiden ja dokumenttien revisiointia, mutta tuotemallin päivitettävyyttä testattiin tekemällä suunnittelusääntöihin yksittäisiä muutoksia ja luomalla muuttuneelle tuotteelle uudet nimikkeet PDM-järjestelmään tuotemallin mukaisesti. Työssä tehdyn arvioinnin mukaan globaalisti MFC:lla käytetään vuosittain noin 3000 tuntia valmistuspiirustusten ja tuotenimikkeiden revisiointiin, mistä noin 64%, eli hieman alle 2000 tuntia pystyttäisiin säästämään suunnitteluautomaation avulla. Prosentuaalinen arvo perustuu samaan oletukseen kuin uusien valmistusdokumenttien ja nimikkeiden osalta eli työstä noin 20% kuluu automaatin ulkopuolelle jäävien erikoistuotteiden suunnitteluun ja yksittäiseen automatisoituun tehtävään kuluu 80% vähemmän aikaa manuaaliseen suunnitteluun verrattuna. Tosin toteutettavien revisiointien määrä voisi olla nykyistä suurempi, sillä resurssivajeen vuoksi kaikkia tuotepäivityksiä ei saada aina tehtyä toivotulla tavalla. MFC:n tuotekanta on niin laaja, että tiettyjen päivitysten manuaalinen toteuttaminen vaatisi hyötyihin nähden liian paljon aikaa. Suunnitteluautomaattien mahdollistamalla massarevisioinneilla perustuotteita koskevat muutokset voitaisiin päivittää automaattisesti tuotemalliin tehtyjen muutosten mukaisiksi murto-osassa manuaalisiin revisioihin kuluva ajasta. Näin ollen myös tuotteiden laatu ja kilpailukyky kasvaisi ylläpidon kautta. Toisaalta kustomoitujen tuotteiden ylläpito jäisi edelleen manuaalisesti toteutettavaksi, sillä automaatti ei voi itsestään tietää, kuinka päivitys vaikuttaisi manuaalisesti muokattuihin tuotteisiin.

5.2 Suositellut jatkotoimenpiteet

Käyttöönottokokeilussa toteutettu automaatti oli onnistunut demonstraatio suunnitteluautomaatiolla todennäköisesti saavutettavista hyödyistä. On silti syytä huomioda, että toteutettu kokonaisuus on irrallaan MFC:n muusta datasta sekä suunnittelukäytännöistä. Täten ensimmäinen jatkotoimenpide on pohtia, kuinka suunnitteluautomaatti olisi integroitavissa MFC:n päivittäisiin suunnittelukäytäntöihin ja olemassa oleviin ohjelmistoihin sekä järjestelmiin ja mitä nykyisiä tehtäviä tai ohjelmistoja automaatti korvaisi. Lähes kaikki käyttöönottokokeilussa käytetty data luotiin tietokantoihin automaattia kehitettäessä, joten esimerkiksi olemassa olevan tuotenimikkeistön tuominen järjestelmään on merkittävä haaste ja sitä varten nimikkeistöä täytyisi yhdenmukaistaa vähintään standardiosille nimeämisen ja mahdollisten 3D-mallien luomisen osalta. Tosin nimikkeistön ja 3D-mallien standardoiminen on hyvin suositeltavaa ilman suunnitteluautomaattiotakin luvussa 5.1 mainittujen hyötyjen vuoksi. Muutenkin toimintamalleja suunnittelusäännösten luomiselle ja suunnitteluautomaatin käytölle tulee standardoida yrityksen sisällä. Myös integrointi olemassa oleviin järjestelmiin on erittäin tärkeä ja suunnittelua vaativa vaihe. Esimerkiksi käyttöönottokokeilussa PDM-järjestelmänä

käytettiin Teamcenteriä MFC:lla yleisessä käytössä olevan ATON-ohjelman sijaan. Tämänhetkinen ATON-versio alkaa olla käyttöikänsä lopussa ja PDM-järjestelmä aiotaan uudistaa MFC:lla lähitulevaisuudessa. Olemassa olevan nimikkeistön kannalta yksi tärkeimmistä kysymyksistä onkin: halutaanko suunnitteluautomaatti ottaa käyttöön yhdessä nykyisen PDM-järjestelmän kanssa vai siirrytäänkö suoraan tuottamaan nimikkeistöä uuteen järjestelmään? Jos integraatio nykyiseen järjestelmään halutaan tehdä, se voisi olla mahdollista esimerkiksi Microsoftin SQL Server -alustaa hyödyntäen. Microsoft SQL Server on tietovarasto, jota käyttävät tuhannet Microsoftin sekä kolmansien osapuolien ohjelmistot kuten SAP (Buffington 2010, s. 267), Rulestream ja ATON.

Päätösten jälkeen suunnitteluautomaatin ohjelmistokokonaisuuteen ja työskentelykäytäntöihin sijoittumisesta tulisi testata käyttöönottokokeilussa koeistamatta jääneitä ominaisuuksia, jotka asetettiin vaatimuksiksi lopulliselle automaatio-ohjelmistolle. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi sarja-ajot, piirustus- ja nimikerevisioiden tuottaminen sekä revisioiden hallinta. Sarja-ajoissa tulisi pystyä suunnittelemaan tuotteita automaattilla ennalta määritettyjen käyttöliittymävalintojen perusteella siten, että erilaisia valintakombinaatioita lisätään listaan, jota automaatti pystyy lukemaan. Tämän jälkeen automaatti tuottaisi ilman ohjelman aktiivista valvontaa syöttöarvojen mukaiset nimikkeet osalistoineen, attribuuttitietoineen, 3D-kokoonpanoineen ja -malleineen sekä piirustuksineen. Kyseistä toimintoa varten Rulestreamissa on batch-toiminto, jonka avulla suunnitteluautomaatti olisi hyvin tehokas sarjasuunnittelun työkalu. Suunnittelijan tehtäväksi jäisi tarkastaa automaatin tekemä työ. Sarja-ajo-ominaisuutta tulisi hyödyntää myös revisioiden luonnissa ja hallinnassa tuotteiden ylläpidossa. Kuitenkin ennen automaattista revisioiden luontia ohjelmaan tulisi sisällyttää selkeä logiikka siitä, millaisissa muutoksissa olemassa oleva tuote revisioidaan ja milloin luodaan uusi tuote uusine nimikkeineen. Sama logiikka tulisi määrittää myös piirustuksille ja 3D-malleille.

Konseptikehityksessä hyödynnettävien toiminnallisuuksien osalta käyttöönottokokeilussa tuotemalliin sisällytetty säännöstö ei täysin vastaa MFC:n venttiilien suunnittelusääntöjä. Kyseessä on 1990-luvulla kehitetty tuote, joten tarkkojen alkuperäisten sääntöjen kokoamista tuotemalliin ei pidetty kokeiluvaiheessa tärkeänä tai realistisena sovitun aikataulun puitteissa. Kuitenkin tapauksessa, jossa automaatti otettaisiin käyttöön oikeassa tuotesuunnittelussa, luotua säännöstöä tulisi korjata, tarkentaa ja laajentaa käyttö-tarkoituksesta riippuen. Vaikka käyttöönottokokeilussa toteutettuun automaattiin ei voitu lisätä kaikkia lopulliselta ohjelmalta vaadittuja ominaisuuksia, niiden toteuttaminen pystyttiin kuitenkin arvioimaan mahdolliseksi Rulestream-ohjelmalla. Kaikkien haluttujen ominaisuuksien koeistamiseksi MFC:lla olisi syytä jatkaa suunnitteluautomaatin kehittämistä onnistuneen käyttöönottokokeilun jälkeen vaiheittaisella käyttöönotolla, jossa suunnitteluautomaatti liitetään kiinni todellisiin suunnittelutehtäviin.

Käyttöönotto tulisi aloittaa sellaisesta kokonaisuudesta, jossa hyödyt olisivat saavutettavissa mahdollisimman nopeasti ja joka pystyy todistamaan uusia ominaisuuksia suunnitteluautomaatin toiminnasta. Kirjoittajan ehdotus käyttöönottoon on kolmivaiheinen:

1. yksittäisen osan tai osakokonaisuuden sarjasuunnittelu ja ylläpito
2. kokonaisen uuden tuotteen sarjasuunnittelu ja ylläpito
3. kokonaisen uuden tuotteen konseptikehitys, sarjasuunnittelu ja ylläpito.

Suunnitteluautomaatin tuotemallin laajuus ja monimutkaisuus kasvaa vaiheiden mukaan, kuten myös automaatilla saavutettavat hyödyt. Myös automaatin käyttäjäkunta kasvaa siten, että ensimmäinen vaihe on toteutettavissa yhden työntekijän voimin, joka on samalla automaatin kehittäjä ja loppukäyttäjä. Kolmannen vaiheen lopussa tuotemallin rakentajia on muutamia, mutta loppukäyttäjiä voi olla jo useita kymmeniä.

Ensimmäisen vaiheen toteutukseen valittaisiin sellainen osa tai osakokonaisuus, jossa nimikkeistöä puuttuu merkittävä määrä tai sen ylläpito on haastavaa. Kyseinen kokonaisuus voisi olla esimerkiksi jo käyttöönottokokeilussa osin toteutettu pesäautomaatti MFC:n XA-sarjan palloventtiilille. Olemassa olevaa suunnitteluautomaattia jatkokehittämällä voitaisiin hyvinkin nopeasti luoda ohjelma, jolla pystytään tuottamaan standardikonstruktioille pesänimikkeet 3D-malleineen, loppukoneistuspiirustuksineen ja attribuuttitietoineen. Ohjaaviksi syöttöarvoiksi rajattaisiin ainoastaan venttiilin kokoluokka, paineluokka, putkilaippapinta ja pesämateriaali. Näiden valintojen avulla saataisiin käyttöönottokokeilussa toteutetulla laajuudella tuotettua nimikkeet lähes tuhannelle erilaiselle venttiilin pesävaihtoehdolle. Kyseisten osien osalistalle voitaisiin automaattisesti lisätä olemassa olevat manuaalisesti tuotetut esikoneistetut aihionimikkeet PDM-järjestelmästä. Muutoksen tapahtuessa tuotettua nimikkeistöä ja piirustuksia päästäisiin revisioimaan, jos logiikka revisioinnille lisätään tuotemalliin. 3D-mallien geometrisiin muutoksiin sekä attribuuttitietoihin, kuten materiaaliin, massaan ja sallittuihin lämpötila-arvoihin tarvittavat säännöt ja taulukot on valmiiksi luotuna. Näin ollen jo ensimmäisessä vaiheessa päästäisiin kokeilemaan sarja-ajojen ja revisiointien toimivuutta todellisessa suunnitteluympäristössä nopeallakin aikataululla. Ensimmäinen vaihe voidaan toteuttaa myös uudelle tuotteelle hyödyntämällä käyttöönottokokeilussa luotua ASME- ja EN-standardien mukaista geneeristä laippageometrian määrittystä. Myös materiaalitaulukot ovat geneerisiä, joten samoja taulukoita voidaan hyödyntää minkä tahansa venttiilisarjan suunnittelussa.

Käyttöönoton toinen vaihe tulisi suorittaa joko yhdessä tai erikseen ensimmäisen vaiheen kanssa. Jos ensimmäinen vaihe on toteutettu uudelle tuotteelle, luodun automaatin laajentaminen koko venttiilin sarjasuunnittelua koskevaksi on looginen tapa jatkaa automaatin kehittämistä. Sarjasuunnittelussa luotaisiin valmiista konseptisuunnitelmasta perustuotteiden tuotenimikkeitä ja piirustuksia automaattisesti kaikille venttiilin osille kaikilla tuotemallissa sallituilla kombinaatioilla. Toisessa vaiheessa tulee kuitenkin huomioida, että resursseja on varattava huomattavasti ensimmäistä vaihetta enemmän, sillä ohjelman kehittäminen esimerkiksi kaikkien venttiilin osien piirustusten automaattiseen tuottoon vaatii merkittävästi aikaa. Kakkosvaiheen käyttöönotto olisi aikataulullisesti järkevää sellaiselle tuotteelle, joka on diplomityön valmistumishetkellä konseptikehitysvaiheessa.

Käyttöönoton kolmannessa vaiheessa automaattiin tulisi sisällyttää myös konseptikehityksen tarpeet, minkä vuoksi tuotemalliin sisällytettävä säännöstön määrä kasvaa merkittävästi. Kolmosvaiheeseen olisi valittava sellainen tuote, joka on diplomityön valmistuessa ideointivaiheessa, mutta konseptikehitystä ei ole vielä aloitettu. Näin ollen kakkosvaiheeseen valitun tuotteen sarjasuunnittelu saataisiin loppuun ennen kolmosvaiheen aloittamista uuden tuotteen kanssa. Eri käyttöönottovaiheissa on alusta alkaen huomioitava, että jokaiselle tuotesarjalle on syytä rakentaa oma tuotemallinsa, jonne sarjakohtainen säännöstö kerätään. Venttiilien suunnittelussa on kuitenkin suuri määrä geneeristä venttiilisarjasta riippumatonta säännöstöä, joka voidaan kerätä omaan tuotemalliinsa, josta tieto on kopioitavissa sarjakohtaisiin tuotemalleihin. Tätä demonstroitiin käyttöönotto-

kokeilun GeneralF-tuotemallilla. Näin toimiessa suunnittelusäännöstö sekä tuotemallit ja siten koko tuotetieto pysyy helposti ylläpidettävänä ja uudelleenkäytettävänä. Kolmosvaiheen jälkeen MFC:lla olisi tuotteissaan vähintään kaksi automaatin avulla ylläpidettävää tuotesarjaa, joista toinen on suunniteltu automaatin mahdollistamaa optimointia hyödyntäen. Jatkossa uusien ja olemassa olevien tuotesarjojen lisääminen automaattiin olisi entistä nopeampaa valmiiksi luodun uudelleenkäytettävän säännöstön sekä opittujen toimintamenetelmien pohjalta. Viimeistään tässä vaiheessa olisi syytä pohtia automaatin hyötyjä venttiiliin lisäksi myös muiden MFC:n tuottamien venttiiliyhdistelmiin kuuluvien komponenttien suunnittelutehtävissä.

MFC on maailmanlaajuinen ja erittäin laaja yritys. Suunnitteluautomaatin käyttö tulisi vaikuttamaan merkittävästi useiden työntekijöiden tehtäviin ja näin ollen on erityisen tärkeää, että suunnitteluautomaatin vaiheittaisesta kehityksestä ja käyttöönotosta informoidaan mahdollisimman laajasti kaikkia henkilöitä, joiden työntekoon suunnitteluautomaatti vaikuttaisi. Näin pystytään lievittämään mahdollista muutosvastarintaa, joka inhimillisistä syistä usein syntyy yllättäviä suuria muutoksia kohtaan. Työntekijöitä tulee myös pyrkiä motivoimaan erityisesti mahdollisuudella käyttää enemmän aikaa luovaan suunnittelutyöhön rutiininomaisten tehtävien sijaan. Usein ensimmäinen ajatus työn tehostumisessa on se, että henkilöstöä voidaan vähentää, mikä ei kuitenkaan ole välttämättä kauaskantoinen ajatus. Suunnitteluautomaatin sisältämää insinööriosamista voidaan ylläpitää ja kehittää vain niin pitkään kuin tarvittava osaaminen on saatavilla yrityksessä. Kun suunnittelijoiden itseään toistavaan työhön kuluva aikaa vähennetään, heillä on mahdollisuus kehittää omaa osaamistaan entisestään ja mahdollistaa yrityksen jatkuva oppiminen. Suunnitteluautomaatio ei muuta sitä, että yrityksen osaaminen, tietotaito ja menestys on riippuvainen yrityksen työntekijöistä. Sen sijaan suunnitteluautomaatio mahdollistaa työntekijöiden osaamisen ja tietotaidon tehokkaamman hyödyntämisen sekä tuotteiden laadun parantamisen ja siten yrityksen entistä paremman menestyksen. Kirjoittajan näkemys on, että CAD-integroitujen suunnitteluautomaattien käyttö on erinomainen mahdollisuus MFC:lle kehittää omaa toimintaansa ja samalla toimia yhtenä suunnannäyttäjänä muillekin suomalaisille teollisuusyrityksille.

6 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tarkasteltiin mahdollisuutta hyödyntää CAD-integroituja suunnitteluautomaatteja Metso Flow Control Oy:n tuotesuunnittelun tehtävissä. Työn tavoitteina oli löytää keino tehostaa itseään toistavaa suunnittelutyötä suunnitteluautomaatin avulla, löytää ohjelmistotutkimuksen ja yrityksen tarpeiden selvityksen avulla sopivin ohjelmisto, tehdä valitulla ohjelmistolla käyttöönottokokeilu mahdollisten hyötyjen todistamiseksi sekä herättää ja ylläpitää keskustelua suunnittelukäytäntöjen ja -järjestelmien uudistamisen tarpeesta. Teoriatutkimuksen aikana ilmeni, että työn aihe oli huomattavasti odotettua laajempi ja siten myös työlämpi. Tähän vaikutti työn aloitushetkellä kirjoittajan hyvin rajallinen tuntemus CAD-integroiduista suunnitteluautomaateista. Lisäksi työn aihe oli kirjoittajan itse keksimä, joten valmista suunnitelmaa työn toteuttamiselle, laajuudelle tai tavoitteille ei ollut.

Työssä suoritettiin teoriatutkimuksen lisäksi ohjelmistotarjoajayritysten haastatteluihin ja alan kirjallisuudesta löytyviin referensseihin perustuen tutkimus olemassa olevista kaupallisista suunnitteluautomaatio-ohjelmistoista. Syvällisempi tutkimus rajattiin kolmeen potentiaalisimmaksi havaittuun vaihtoehtoon. Toimeksiantajayrityksen vaatimusten ja toiveiden kartoittamiseksi suoritettiin eri suunnittelutehtävien asiantuntijoiden haastatteluja. Haastatteluista saatujen tietojen perusteella luotiin käyttötapausesimerkkejä ja vaatimuslista, joiden avulla Rulestream ETO pystyttiin arvioimaan yrityksen tarpeisiin sopivimmaksi ohjelmistoksi. Valitulla ohjelmistolla luotiin työn kokeellisessa osiossa CAD-integroitu suunnitteluautomaatti teoriatutkimuksessa havaittujen mahdollisten hyötyjen osoittamiseksi toimeksiantajayrityksessä. Luodulla suunnitteluautomaatilla hyödyt pystyttiin osoittamaan todelliseksi erityisesti itseään toistavan työn tehostamisen osalta. Työssä toteutetun käyttöönottokokeilun tuloksia on esitelty globaalisti lukuisissa eri tilaisuuksissa yrityksen sisällä ja työn päättyessä näyttää todennäköiseltä, että yritys jatkaa työssä toteutetun suunnitteluautomaatin kehittämistä ja käyttöönottoa. Täten työssä saavutettiin kaikki sille asetetut tavoitteet ja työ herätti jopa odotettua enemmän kiinnostusta yrityksen sisällä. Tätä edesauttoivat työn aikana ilmi käyneet toimeksiantajayrityksen aikaisemmat kokemukset suunnitteluautomaattien käytöstä. Tavoitteiden valossa työtä voidaan pitää varsin menestyksekkäänä ja työn kirjoittaja sekä toimeksiantajayritys ovat tyytyväisiä saavutettuihin tuloksiin.

Työssä pystyttiin osoittamaan, että CAD-integroidun suunnitteluautomaatin käytöllä voidaan oikein ja oikeassa käyttökohteessa käytettynä saavuttaa merkittävä kilpailuetu erityisesti tuotesuunnittelun tehokkuuden ja tuotteen laadun osalta. Tehdyn työn perusteella on kuitenkin mahdotonta tietää tarkkaan, kuinka suuria hyötyjä suunnitteluautomaatilla on toimeksiantajayrityksessä lopulta mahdollista saavuttaa. Tietoa varten tulisi tehdä jatkotutkimusta siitä, kuinka kauan tuotemallin ja koko suunnitteluautomaatin luominen todelliseen käyttöön vie yrityksessä aikaa ja miten hyvin tuotteita voidaan automaatin avulla todellisuudessa ylläpitää. Työssä esitetyt tulokset ovat kuitenkin hyvin rohkaisevia ja antavat hyvän alustan suunnitteluautomaatin jatkokehitykselle ja -tutkimukselle. Metso Flow Control on huomattavan suuri ja globaali organisaatio, joten suunnitteluautomaatin käyttöönoton kaltaiset uudistukset vaativat huolella tehdyn taustatyön. Taustatyössä tulee ottaa huomioon käytössä olevat muut järjestelmät, mihin tässä työssä ei CAD-ohjelmiston valintaa lukuun ottamatta juurikaan kiinnitetty huomiota. Lisäksi tulee luoda selkeä suunnitelma siitä, miten suunnitteluautomaatti saadaan käyttöön vaiheittain niin, että sen koko toiminnallisuus pystytään todistamaan ja halutut hyödyt saavutetaan mahdollisimman

nopeasti. Suunnitteluautomaatin käyttöönotto vaikuttaisi myös monen työntekijän työtehtäviin, joten työntekijöiden aktiivista tiedottamista ja motivointia tulee jatkaa.

Kirjoittajan näkemys on, että erityisesti suomalaisten teollisuusyritysten tulisi olla aiempaakin vastaanottavaisempia ja rohkeampia teknologian kehitykselle ja toimintatapojen uudistamiselle. Suunnitteluautomaation kaltaisilla uudistuksilla on mahdollista saavuttaa merkittävää kilpailuetua sekä säilyttää suomalainen suunnittelutyö ja insinööriosaaaminen maailman kärkitasolla. Jos jatkuvaa kehittymistä ja oppimista hidastetaan tutuiksi tulleiden toimintatapojen ja -mallien vaalimisen vuoksi, kehityksen kärjessä kulkevat kilpailijat voivat saavuttaa etulyöntiaseman, minkä havaitseminen markkina-asemaa menettäessä voisi olla jo myöhäistä.

Lähdeluettelo

Aho, M. 2008. Tietovarastointiratkaisut massaräätälöinnin tukena. Mass Customization and Personalization. Espoo 17.9.2008-18.9.2008. Saatavissa:

http://www.drmika.com/download/Aho_-_Tietovarastointiratkaisut_massaraataloinnin_konfiguraattoreiden_tukena.pdf.

Amadori, K., Tarkian, M., Ölvander, J. & Krus, P. 2012. Flexible and robust CAD models for design automation. Advanced Engineering Informatics. Vol. 26:2. S. 180-195. ISSN 1474-0346.

Buffington, Jason. 2010. Data Protection for Virtual Data Centers. 1st ed. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing. 504 s. ISBN 978-0-470-57214-6.

CadWorks. 2016. AutomateWorks [verkkoaineisto]. [viitattu 28.10.2016]. Saatavissa: <http://www.cadworks.fi/fi/tuotteet/automateworks>.

Chapman, C. B. & Pinfold, M. 2001. The application of knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure. Advances in Engineering Software. Vol. 32:12. S. 903-912. ISSN 0965-9978.

Cheok, B. T. & Nee, A. Y. C. 1998. Trends and developments in the automation of design and manufacture tools for metal stamping. 1998. Journal of Material Processing Technology (Netherlands). Vol. 75:1-3. S. 240-252. ISSN 0924-0136.

Chung, J. C. H., Hwang, T. S., Wu, C. T., Jiang, Y., Wang, J. Y., Bai, Y., & Zou, H. 2000. Framework for integrated mechanical design automation. Computer-Aided Design, Vol. 32:5-6. S. 355-365. ISSN 0010-4485.

Corallo, A., Laubacher, R., Margherita, A. & Turrise, G. 2009. Enhancing product development through knowledge-based engineering (KBE): A case study in the aerospace industry. Journal of Manufacturing Technology Management. Vol. 20:8. S. 1070-1083. ISSN 1741-038X.

Felfernig, A. 2014. Knowledge-Based Configuration: From Research to Business Cases. Amsterdam: Morgan Kaufmann. 357 s. ISBN 9780124158696.

Hirz, M., Dietrich, W. Gferrer, A. & Lang, J. 2013. Integrated computer-aided design in automotive development: development processes, geometric fundamentals, methods of CAD, knowledge-based engineering data management. London: Springer. 482 s. ISBN 978-3-642-11940-8.

La Rocca, G. & van Tooren, M. 2012. Knowledge based engineering to support complex product design. Advanced Engineering Informatics. Vol. 26:2. S. 157-158. ISSN 1474-0346.

La Rocca, G. 2012. Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. Vol. 26:2. S. 159-179. ISSN 1474-0346.

Lad, A. C. & Rao A. S. 2014. Design and Drawing Automation Using SolidWorks Application Programming Interface. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*. Vol. 2:7. S. 157-167. ISSN 2349-4395.

Lombard, Matt. 2013. *SolidWorks 2013 Bible*. Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons, Inc. 1251 s. ISBN 978-1-118-50840-4.

Lowe, A. G. & Hartman N. W. 2011. A Case Study in CAD Design Automation. *Journal of Technology Studies*. Vol. 37:1. S. 2-9. ISSN 1071-6084.

Mathew, A. T. & Rao, C. S. P. 2010. A Novel Method of Using API to Generate Liaison Relationships from an Assembly. *Journal of Software Engineering and Applications*. Vol. 3:2. S. 167-175. ISSN 1945-3116.

Mayr, H. 2002. *Virtual Automation Environments*. New York: Marcel Dekker, Inc. 272 s. ISBN 0-8247-0736-2.

Metso. 2013. *Talisman-project Evaluation of 3D-configuration tools*.

Metso. 2016a. *Metso lyhyesti [verkkoaineisto]*. [viitattu 9.10.2016]. Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/yritys/metso-yrityksena/metso-lyhyesti/>.

Metso. 2016b. *Avainluvut [verkkoaineisto]*. [viitattu 9.10.2016]. Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/yritys/sijoittajat/taloudellista-tietoa/avainluvut>.

Metso. 2016c. *Tuotteet [verkkoaineisto]*. [viitattu 13.10.2016]. Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/tuotehaku/?industry=Öljy+ja+kaasu>.

Metso. 2016d. *Yleistä tietoa [verkkoaineisto]*. [viitattu 13.10.2016]. Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/yritys/sijoittajat/metso-sijoituskohteena/yleista-tietoa/>.

Metso Recycling. 2017. *Lindemann PowerCut [verkkoaineisto]*. [viitattu 19.4.2017]. Saatavissa: <http://www.metso.com/products/metal-recycling-scrap-processing-solutions/lindemann-power-cut-scrap-shear/>.

Modig, N. & Åhlström, P. 2013. *Tätä on lean*. Kolmas painos. Tukholma: Rheologica Publusing. 167 s. ISBN 978-91-980393-3-7.

Peltonen, H. 2000. *Concepts and an Implementation for Product Data Management*. Väitöskirja. Helsinki University of Technology, Department of Computer Science and Engineering. Suomi. 188 s.

Peltonen, H., Martio, A. & Sulonen, R. 2002. *PDM – Tuotetiedonhallinta*. 1. painos. Helsinki: Edita Prima Oy. ISBN 951-826-664-6.

Piper, A. 2015. Manufacturing In 3D. *Risk Management*. Vol. 62:2. S. 16-19. ISSN 0035-5593.

Prince, S. P., Ryan, R. G. & Mincer, T. 2005. Common API: Using Visual Basic to Communicate between Engineering Design and Analytical Software Tools. 2005 ASEE Annual conference.

Qtaish A. & Ahmad K. 2015. Model mapping approaches for XML documents: A review. *Journal of Information Science*. Vol. 41:4. S. 444-466. ISSN 0165-5515.

RD Velho Oy. 2016. Yrityksen verkkosivut [verkkoaineisto]. [viitattu 24.10.2016]. Saatavissa: <http://rdvelho.com/fi/>.

Salchner, M., Stadler, S., Hirz, M., Mayr, J. & Ameye, J. 2016. Multi-CAD approach for knowledge-based design methods. *Computer-Aided Design and Applications*. Vol. 13:4. S. 471-483. ISSN 1686-4360.

Sandberg, M., Tyapin, I., Kokkolaras, M., Isaksson, O., Aidanpää, J. & Larsson, T. 2011. A Knowledge-based Master-model Approach with Application to Rotating Machinery Design. *Concurrent Engineering: Research and Applications*. Vol. 19:4. S. 295-305. ISSN: 1063-293X.

Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 2017. Rulestream Essentials, Training Reference Guide, Rulestream ETO 8.12, NX and Teamcenter Edition.

SolidWorks. 2017. Partner Products [verkkoaineisto]. [viitattu 17.4.2017] Saatavissa: <http://www.solidworks.com/sw/products/engineering-software-partners.htm>.

Su, S., Hu, Y. & Wang, C. 2015. The Key Technology Research about 3D CNC Bending Machine and Experimental Verification. *Journal of Coastal Research*. Vol. 73:1. S. 584-588. ISSN 0749-0208.

Syrjänen, T. 1999. A Rule-based Formal Model for Software Configuration. Espoo: Helsinki University of Technology, Department of Computer Science and Engineering, Laboratory for Theoretical Computer Science. 74 s. ISBN 951-22-4881-6.

Tacton. 2016. About Tacton [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2016]. Saatavissa: <http://www.tacton.com/about-tacton/>.

Teodorov, C. & Lagadec, L. 2014. Model-driven physical-design automation for FPGAs: fast prototyping and legacy reuse. *Software: Practice and Experience*. Vol. 44:4. S. 455-482. ISSN 0038-0644.

Tiihonen, J. & Soininen, T. 1997. Product Configurators – Information System Support for Configurable Products. Espoo: Helsinki University of Technology, Department of Computer Science and Engineering, Laboratory of Information Processing Science. 23 s.

Trehan, V. Chapman, C. & Raju, P. 2015. Informal and formal modelling of engineering processes for design automation using knowledge based engineering. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. Vol. 16:9. S. 706-723. ISSN 1862-1775.

Verhagen, W. C. C., Bermell-Garcia, P., van Dijk, R. E. C. & Curran, R. 2012. A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. *Advanced Engineering Informatics*. Vol 26. S. 5-15. ISSN 1474-0346.

Wang, J., He, Y., Tian, H. & Cai, H. 2008. Retrieving 3D CAD model by freehand sketches for design reuse. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 62:3. S. 385-392. ISSN 1474-0346.

Willner, O., Gosling, J. & Schönsleben, P. 2016. Establishing a maturity model for design automation in sales-delivery processes of ETO products. *Computers in Industry*. Vol. 82. S. 57-68. ISSN 0166-3615.

Haastattelut ja esitykset:

Järviö, K. 2016. PLM Group Suomi Oy. Haastattelu. Puutarhakatu 53, 20100 Turku. 2.11.2016.

Karvonen, I. & Renko, J. 2016. Ideal Product Data Oy. Haastattelu. Jaakonkatu 2, 01620 Vantaa. 1.11.2016.

Keijser, J. & Lindström, I. 2016. Tacton Systems AB. Haastattelu. Fleminggatan 7. SE-112 26 Stockholm. 16.11.2016.

Kelho, H. 2016. RD Velho Oy. Esitys. Perintötie 2 C, 01510 Vantaa. 21.10.2016.

Määttänen, K. & Kuusi, T. 2016. ENTOP Oy. Rautaniemenkatu 19 A, 15110 Lahti. 1.11.2016.

Simpanen, E. & Laaksonen, T. 2016. CadWorks Oy. Haastattelu. Helsingintie 44, 04430 Järvenpää. 27.10.2016.

Liiteluettelo

Liite 1. Ohjelmistovaatimukset. 3 sivua.

Liite 2. Käyttötapausesimerkit. 5 sivua.

Liite 3. Käyttöönottokokeilun suunnitteluautomaatin toimintakaavio. 1 sivu.

Liite 4. Automaatin tuottamat koneistuspiirustukset. 1 sivu.

Liite 5. Automaatilla saavutettu hyöty kustomoinnissa. 1 sivu.

Liite 1. Ohjelmistovaatimukset

Ohjelmistovalinnan helpottamiseksi luotiin käyttötapausesimerkkien perusteella vaatimuslista ohjelmistolle asetetuista vaatimuksista ja toiveista. Jokaisen ohjelmiston toimintaa arvioitiin sanallisesti kyseisten vaatimusten perusteella. Arviointi on jätetty pois työssä esitettävästä versiosta.

User group	Need	Requirement	Wish
General	Compatibility:	Compatible with SolidWorks	
			Use is not constrained to certain external CAD, PDM or calculation software
	Security:	Cloud services can't be used for storing engineering data	
	Software supplier:	Compatibility updates for external software integrations must be implemented by them	
		Also other major customer companies	
			Customer companies globally
			Suppliers and support globally, also in Finland
	Hardware:	Metso's standard workstation (e.g. Lenovo T430 laptop) has to be able to run all the software features	
	Proof of concept:	POC executed during 2 months at the beginning of 2017	
			Low cost
	WEB interface:		Global access to the software via WEB interface
	3D modeling:	Geometrically 100% correct valve assemblies created for standard products including all allowed configurations for different sizes, construction options, seat options, shaft seal options, flange facing options etc.	
		Assembly has to include all the parts (also 100% geometrically) correct that the valve includes	
		Clear graphical UI for controlling the configurations	
			Design tree and feature sketches are consistent through the same part family
			3D models comply good 3D modeling rules
	2D drawing:	Manufacturing drawings can be generated automatically for all main parts (body, bonnet, trim, shaft and seat) for all sizes and configurations that the product model includes	

Realization and customization		Drawings have to be 100% correct, but not 100% ready. Small manual adjustments are allowed when creating drawings first time (e.g. changing dimension and sketch positions if needed).	
		Drawings have to comply with the machine drawing rules	
		All drawings for same part type have to be consistent	
			Valve assembly drawings with main dimensions
	Product model:	Able to store all design rules, standards, tables, calculations etc.	
		Creating a product model shouldn't require programming skills	
		Easy to modify and maintain (no programming skills required)	
		Clear graphical UI for creating and editing product model and design rules	
		Revisions for product model with date and editor's name	
		User specified access to read and edit product model	
			Includes the attribute data that is needed for item creation
	PDM automation:	Able to create items for new parts and assemblies	
		Creates BOM for item based on what parts 3D assembly includes	
		Able to search and retrieve existing items and documents	
		Adds attribute data and manufacturing documents automatically for items	
	Geometric optimization:		Optimization of geometries between thinnest allowed material thickness and casting possibilities
			Software has to include possibility for optimizing the construction to best design while complying all the design rules
	Specification document:	User can print out a design verification for calculations when needed	
			User can print out a specification for all the rules and standards used for designing the product
	Typecode identification:	Able to identify valve type code and create a valve assembly based on that	

	FEM analysis:		Integration to ANSYS software for body gasket surface pressure analysis
	File modification:		Direct software independent ability to modify files with XML programming language
	Cost accounting		Able to evaluate manufacturing cost of certain part or construction
Maintenance	Document revisions:	Software has to be able to know which documents it has produced	
		If a change is made to the product model or master model, all the affected documents have to be revised to the latest change automatically	
		Revisions have to be 100% ready if the change does not affect to the geometry (moving dimensions manually is accepted if geometry changes)	
			Manually customized 3D models and drawings need to be revised also (at least a warning for this)

Liite 2. Käyttötapausesimerkit

Käyttötapausesimerkkejä eli use caseja luotiin työn puitteissa 11 kappaletta tarkkojen ohjelmistovaatimusten määrittämiseksi eri suunnitteluosastoilta. Tässä liitteessä on esitelty yksi esimerkki jokaisen suunnitteluosaston tarpeista suunnitteluautomaatiolle.

Concept Generation Use Case: Defining the body joint bolting for a ball valve

User:

RTD engineer

Description:

Define the body joint bolting for a trunnion ball valve. The design of the body joint bolting defines also the bonnet bolting and the designs are dependent on each other.

Preconditions:

Pressure class and basic construction of the valve with included parts is known. There are lot of constraints that has to be known before the definition for body joint bolting can be started. Those include e.g.:

- Geometry guided by ASME 8 standard
- Minimum and maximum diameters for the body neck
- Outer diameter of the gasket
- Outer diameter of the seat bore
- Individual tightening torques for different studs
- Size of the hydraulic tools needed for tightening the body joint and pipe flange bolting
- Face-to-face dimension of the valve

Since the body joint design is highly dependent on the bonnet design, also the bonnet constraints has to be considered including e.g.:

- Geometry guided by ASME 8 standard
- Outer diameter of the gasket
- Diameter of the shaft
- Geometry of the standard packing
- Geometry of the standard bracket
- Individual tightening torques for different studs
- Size of the hydraulic tool needed for tightening the bonnet bolting
- Material of bonnet bolting has to be compatible with body joint bolting material
- Minimum wall thickness

There are also constraints from manufacturing techniques, the stud lengths are standardized and the minimum contact surfaces for threads have to be known.

Goal:

Bolting for body joint and bonnet together with the geometries of the body joint flange and bonnet are defined in a way that the valve is able to pass required tests, can be assembled and can be attached to customer's pipe line.

Basic sequence:

- 1 Define the minimum diameter for body joint bolting
- 2 Perform strength calculations with couple stud sizes
- 3 Select the most promising stud size for body joint bolting
- 4 Define the body geometries based on the selection and predefined constraints
- 5 Select the size for bonnet studs and define rest of the bonnet geometries

Exceptions:

-

Postconditions:

Design for the trunnion ball valve body sealing is ready for testing. The body joint flange and bonnet geometries are defined and bolting sizes are selected.

Current tools:

SolidWorks, Excel, Mathcad, Aton

Serial Design Use Case: Create manufacturing documents for ball valve shaft for different sizes

User:

Documenting engineer

Description:

Create 3D models, manufacturing drawings and items for a new shaft. Documentation and items have to be created to all standard sizes and configurations.

Preconditions:

Main geometries are defined. Main dimensions are known with tolerances and internal standards define backing, shaft end, spline and central bore options. Markings should be made regarding to general practices.

Goal:

Finalized 3D models and drawings are ready for all standard shaft sizes for all configurations. Dimensioning and views in documents seem consistent. Also items are created for all standard sizes and configurations

Basic sequence:

- 1 Create drawings and missing 3D models
- 2 Check the created documents
- 3 Enter the created documents to the PDM system
- 4 Ask colleague to check and supervisor to approve documents
- 5 Create items to PDM system for all the shaft configurations with all the standard material options
- 6 Approve the items

Exceptions:

-

Postconditions:

Documents and items are ready for manufacturing for all the standard shafts that the part family includes.

Current tools:

SolidWorks, Aton

Customizing Use Case: Flushing connection added to valve body

User:

Customer order engineer

Description:

Customer wants a flushing connection as a special requirement to the standard trunnion ball valve for mixing some fluid to the medium. The construction has to be checked for finding a suitable place for the connection. New manufacturing documents has to be created for valve body.

Preconditions:

Engineer wants to check where the hole should be placed so that it doesn't affect to the quality of the valve and the valve can still be assembled. He/she needs at least 3D models for the standard body, flushing connection, body bolting, trunnion plate and seat. Engineer has found out that there is no existing 3D model in the PDM system for the body or seat.

Goal:

Create 3D models and drawings for the body with the flushing connections. The construction is checked in a way that the valve can be manufactured and assembled without negative effects on quality.

Basic sequence:

- 1 Create new 3D models for body and seat from scratch based on old drawings or use old base model if found from PDM system. If old base model is used engineer can't be sure if the geometries are 100% correct.
- 2 Search for right flushing connection with documents
- 3 Create an assembly from the body, seat, bolting and trunnion plate
- 4 Add the hole to a suitable place to the body
- 5 Add the flushing connection to the assembly for checking that the valve still can be assembled
- 6 Create a new machining drawing for the body with connections based on the flushing connection assembly
- 7 Check the new documents
- 8 Ask colleague to check and supervisor to approve the documents

Exceptions:

Sometimes only additional drawing is created for flushing connection hole bore and connection welds.

Postconditions:

Manufacturing documents ready for the customized valve body. Construction is approved for manufacturing.

Current tools:

SolidWorks, SolidPDM, Aton, AutoCAD

Maintenance Use Case: Updating documents according to an ECN**User:**

Document maintenance engineer

Description:

There is a new engineering change notice (ECN) about flange facings for all X-series valves. The standard ASME B16.5 has been revised so that raised face thickness is changed from 2 mm to 3 mm for pressure classes ASME 150 and 300. Search all the 3D models and drawings that are affected and need revising. Revise the documents according to latest ECN.

Preconditions:

The ECN tells exactly what has to be changed. The exact number of 3D models and drawings that need to be updated isn't known but there are more than one hundred of them.

Goal:

The 3D models and drawings has to be up to date in the PDM system so that standard products can be sold without need for engineering work.

Basic sequence:

- 1 Check the ECN and understand what components are affected
- 2 Search all the 3D models and drawings that need to be revised from PDM system
- 3 Create new versions for all the affected documents and make the changes
- 4 Check all the revised documents
- 5 Ask supervisor to approve the documents
- 6 Update the latest document versions for items

Postconditions:

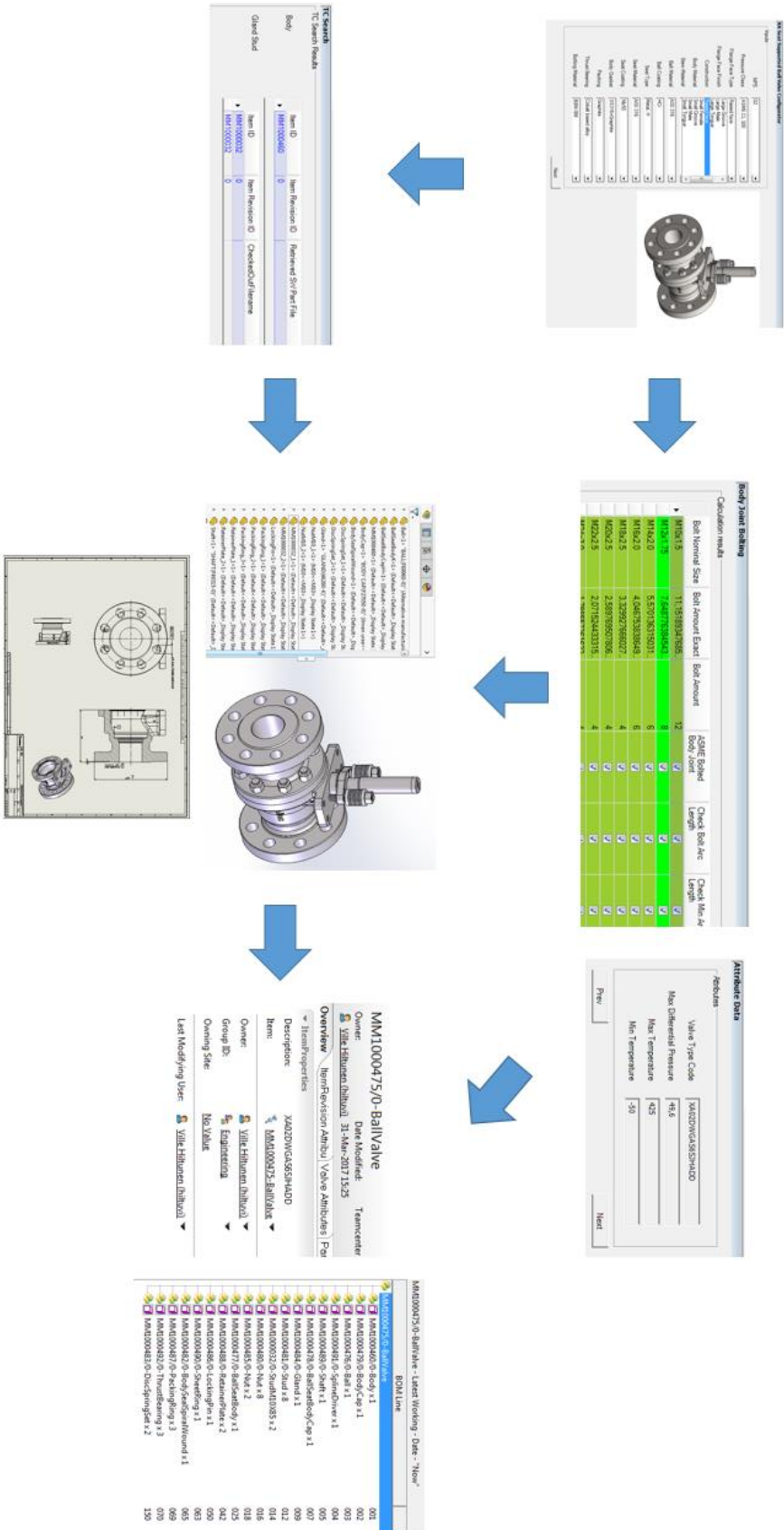
All the body documents are updated to the latest standard, the revised documents are approved and updated to the items.

Current tools:

Aton, SolidWorks, AutoCAD, Microsoft Word

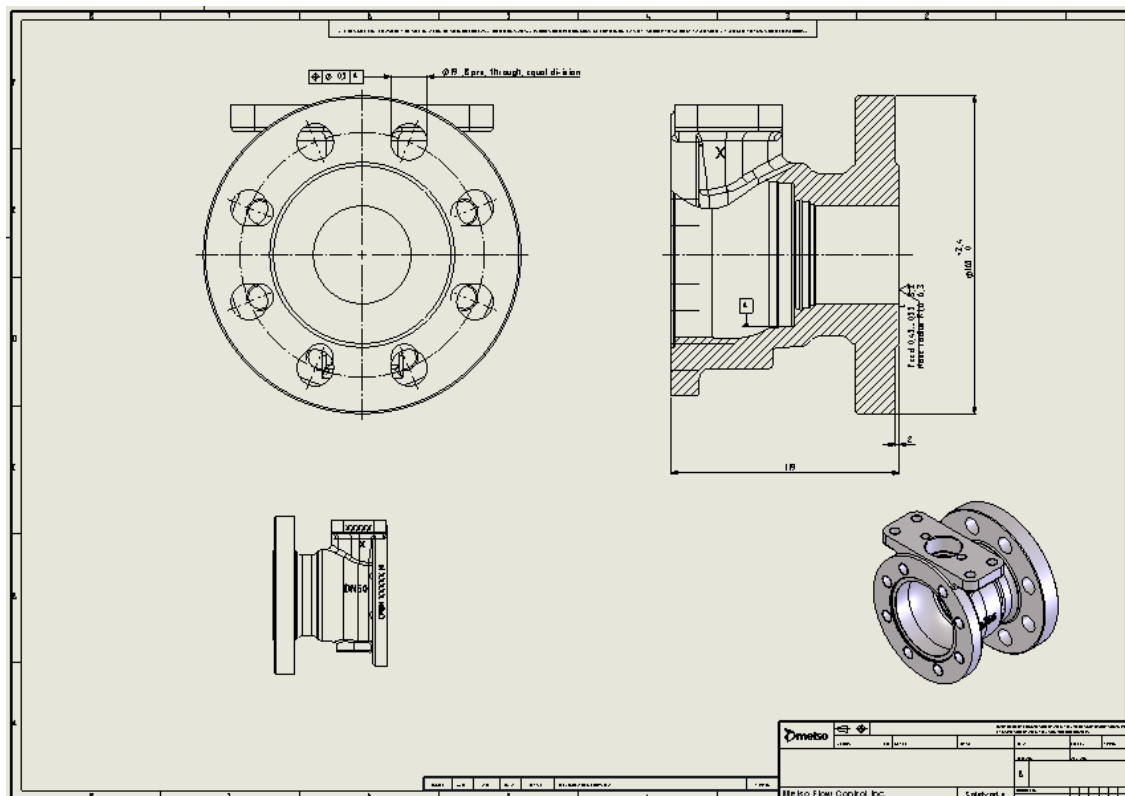
Liite 3. Käyttöönottokokeilun suunnitteluautomaatin toimintakaavio

Liitteen toimintakaavio kuvaa käyttöönottokokeilussa toteutetun suunnitteluautomaatin toimintavaiheita.

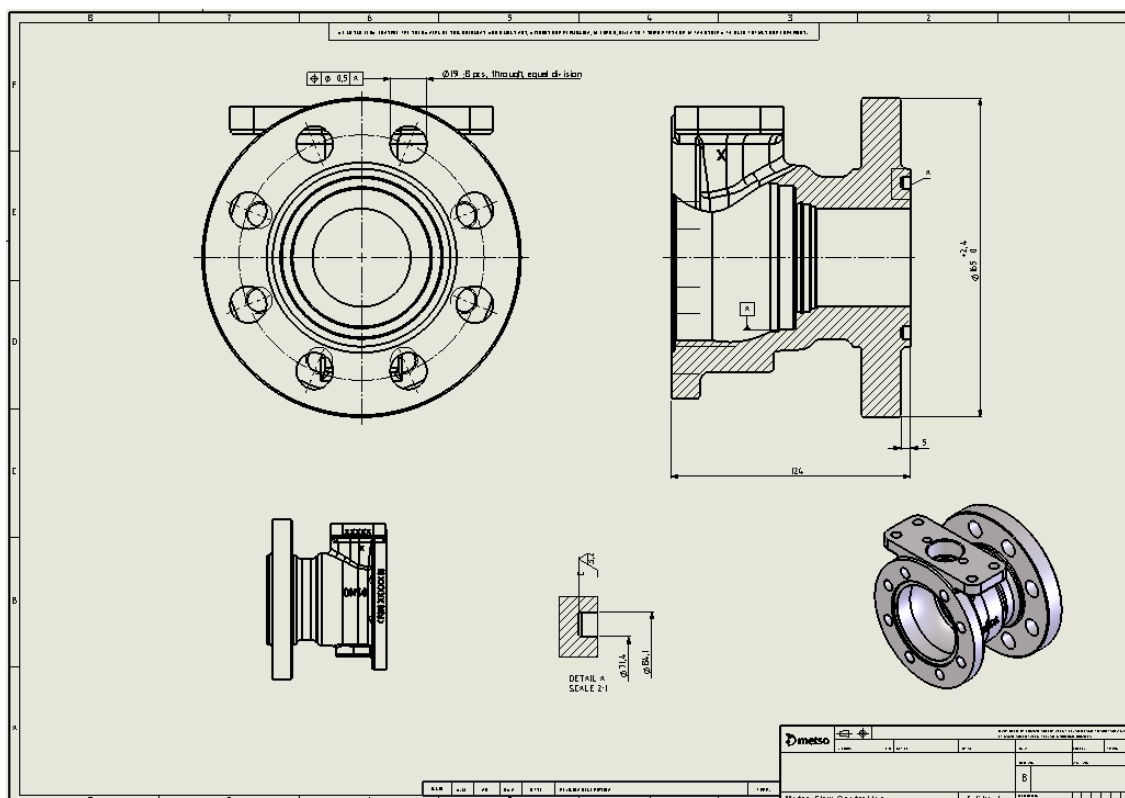


Liite 4. Automaatin tuottamat koneistuspiirustukset

Liitteen piirustukset demonstroivat suunnitteluautomaatin tuottamia variaatioita pesän loppukoneistuspiirustuksista.



Kuva 40 Pesän runkopuoli ASME-standardin "raised face"-laippapinnalla



Kuva 41 Pesän runkopuoli ASME-standardin "small groove"-laippapinnalla

Liite 5. Automaatilla saavutettu hyöty kustomoinnissa

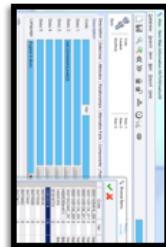
Käyttöönottokokeilussa toteutetun suunnitteluautomaatin suorituskykyä verrattiin kustomoinnin manuaalisiin suunnittelutoimenpiteisiin ja havaittiin, että automaatilla voidaan saavuttaa noin 86% aikahyöty esimerkin tapaisessa yksittäisessä suunnittelutehtävässä.

Esimerkki kustomoidun tuotteen suunnittelusta: erikoispesämateriaali ja -laippapinta

- 86%

Nykyinen tapa (4h):

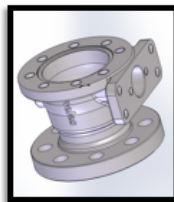
5 min



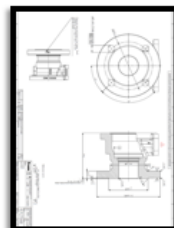
15 min



1,5 h



1,5 h



30 min



10 min



1. Etsi sopiva hyväksytty myyntinimike pohjaksi

2. Luo uudet nimikkeet venttiilille ja pesän puolikalle

3. Mallinna uudet 3D-mallit pesän puolikalle

4. Luo uudet piirustukset pesän puolikalle

5. Tarkasta ja hyväksy mallit ja piirustukset

6. Viimeistele, tarkasta ja hyväksy nimikkeet

Automatisoitu tapa (33 min):

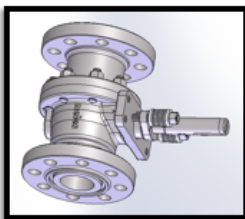
1,5 min



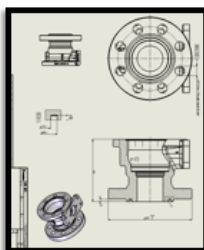
0,5 min



3 min



1 min



2 min



20 min



5 min



1. Syötä lähtöarvot käyttöliittymään ja tarkasta attribuutit

2. Käynnistä Teamcenter-haku valmiiden nimikkeiden löytämiseksi

3. Luo 3D-kokoonpano venttiilistä

4. Luo uudet piirustukset pesän puolikalle

5. Luo uudet nimikkeet venttiilille ja pesän puolikalle

6. Viimeistele, tarkasta ja hyväksy mallit ja piirustukset

7. Tarkasta ja hyväksy nimikkeet